

## **Maestría en Ingeniería Civil**

**Gestión de residuos aceitosos (Y9+A4060) para la generación de oportunidades de aprovechamiento en la industria de hidrocarburos en Colombia a través de un enfoque de economía circular.**

**Angelica María Pacheco Riaño**

**Bogotá, D.C., 31 de enero de 2024**



**Gestión de residuos aceitosos (Y9+A4060) para la generación de oportunidades de aprovechamiento en la industria de hidrocarburos en Colombia a través de un enfoque de economía circular.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Ingeniería Ambiental**

**Laura Cristina Lesmes Posada**  
**Director**

**Bogotá, D.C., 31 de enero de 2024**



La tesis de maestría titulada “Gestión de residuos aceitosos (Y9+A4060) para la generación de oportunidades de aprovechamiento en la industria de hidrocarburos en Colombia a través de un enfoque de economía circular.”, presentada por Angelica María Pacheco Riaño, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

Director de la tesis

Ing. Laura Cristina Lesmes Posada

Jurado

Ing. Amalia Avendaño

Jurado

Dr. Jairo Romero

Bogotá, D.C., 31 de enero de 2024

## **Dedicatoria**

A mi familia, quien estuvo apoyándome en cada paso de este camino y creyeron en mi cuando yo deje de hacerlo.

Esteban, Lluvia, Nieve, Mami y Cami este logro también es de ustedes, y el esfuerzo de este trabajo refleja la inspiración que son para mí y que los sueños por lejos que se vean, si se hacen realidad, para ustedes todo mi corazón y mi profunda admiración.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios, por ser fuente material de inspiración en cada uno de los retos que significo este trabajo, a mi familia por creer en mí y alentarme cuando creía que nunca terminaría.

A mi directora de tesis Ing. Laura Lesmes, por estar atenta a cada una de mis dudas, brindarme guía y orientarme en la culminación de esta investigación.

Y a la empresa donde trabajo, que apoyo este sueño de hacer una maestría y dispuso todo de ellos para que se pudiera materializar.

## Resumen

Durante años, la economía global en conjunto con las diferentes industrias que contribuyen a su progreso ha basado su desarrollo en procesos lineales que consisten en la extracción de materia prima, su transformación para que pueda darse su uso y finalmente la disposición de los residuos que dejó todo el ciclo. Sin embargo, en dicho modelo no se contempla que el planeta es un sistema finito que no puede sostener el ritmo de desarrollo exigido ni almacenar el volumen de residuos generados para su mantenimiento, en especial los categorizados como peligrosos (RESPEL) ya que por su origen pueden causar riesgo y daño a la salud humana y el medio ambiente. Por esta razón surge la necesidad de generar estrategias enfocadas en modelos circulares, donde se busca dar vida útil a los residuos generados, en este caso en los de origen petrolero denominados Y9 (mezclas y emulsiones de desechos de la industria) y A4060 (desechos de dichas mezclas) que tienen el mayor volumen de producción RESPEL en Colombia.

El objetivo principal del trabajo realizado es identificar elementos claves que puedan orientar un aprovechamiento de residuos de este tipo, adoptando un enfoque de economía circular, para así tener una eficiente gestión enfocada en el reuso más que en la disposición final. Para tal fin, en primera instancia se realizó una caracterización a partir de información secundaria de los residuos Y9+A4060, luego una recopilación de información para definir el estado actual de los mismos con un enfoque específico a nivel nacional, el paso siguiente fue la identificación de elementos de la economía circular como lo son principios y herramientas de circularidad aplicables, seguido de esto se definió un marco normativo internacional y nacional aplicable que brinda las directrices de fondo y finalmente la revisión de casos relevantes de investigación, donde el aprovechamiento e incorporación de los residuos a otra cadena productiva sea el principal enfoque.

Dentro de los elementos identificados se encuentran grupos de enfoque en el ciclo y otros en el proceso, los dos de ellos tanto cualitativos como cuantitativos, lo anterior relacionado con el planteamiento de balances de masa y energía para definir entradas y salidas de la cadena de aprovechamiento, y características que limiten o propendan los proyectos de una manera más sencilla y menos costosa. Del mismo modo, herramientas como métricas circulares aplicadas, podrían dar un panorama más claro de los porcentajes de aprovechamiento real, de sinergia de procesos entre cadenas productivas y finalmente con

lo anterior, tener una visión de las implicaciones a los componentes principales del entorno, entendidas como externalidades del medio, que hace referencia a todos aquellos componentes que no forman parte del proceso que conlleva el aprovechamiento pero que pueden ser impactados por el mismo de manera directa o indirecta tanto física, biótica y/o socioeconómicamente.

**Palabras Claves:** Residuos Y9+A4060, economía circular, aprovechamiento, principios, elementos, sostenibilidad.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
JUSTIFICACIÓN .....	13
1. OBJETIVOS .....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 RESIDUOS PELIGROSOS DE TIPO Y9+A4060 .....	15
2.1.1 Origen de los residuos Y9+A4060.....	15
2.1.2 Composición de los residuos Y9+A4060.....	16
2.1.3 Riesgo de los residuos, tratamientos asociados y disposición final.....	18
2.2 ECONOMIA CIRCULAR: PRINCIPIOS Y ELEMENTOS.....	22
2.2.1 Diagrama de la mariposa .....	23
2.2.2 Principios de la economía circular.....	26
2.2.3 Herramientas de circularidad .....	28
3. MARCO NORMATIVO APLICABLE .....	32
3.1 Normatividad internacional .....	32
3.2 Normatividad nacional y regional .....	34
3.3 Otras disposiciones .....	35
4. METODOLOGIA.....	38
4.1 Caracterización de los residuos tipo Y9+A4060 .....	38
4.2 Estado actual de generación y gestión de residuos tipo Y9+A4060.....	39
4.3 Elementos de economía circular .....	39
4.4 Marco normativo aplicable .....	39
4.5 Casos de estudio a nivel nacional e internacional. ....	39
4.6 Identificación de industrias con usos potenciales de RESPEL tipo Y9+A4060 .....	39
4.7 Propuesta de elementos para el aprovechamiento de los residuos tipo Y9+A4060 .....	40
5. RESULTADOS Y CONTRIBUCIÓN .....	41
5.1 ESTADO ACTUAL DE GENERACIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS TIPO Y9 + A4060 .....	41
5.1.1 Antecedentes de generación de residuos peligrosos – panorama global .....	41
5.1.2 Antecedentes Residuos Peligrosos – panorama nacional.....	43

5.1.3 Gestión de residuos Y9 + A4060 en Colombia.....	46
5.1.3.1 Generación.....	47
5.1.3.2 Tratamiento .....	49
5.1.3.3 Aprovechamiento .....	51
5.1.3.4 Disposición final .....	52
5.2 CASOS DE ESTUDIO SOBRE USO DE RESIDUOS Y9+A4060 Y POTENCIALES INDUSTRIAS.....	54
5.2.1 Uso como agregado para construcción y mantenimiento de vías terciarias .....	54
5.2.2 Uso de los residuos para el proceso de producción de combustóleos. ....	56
5.2.3 Uso como combustible para la los hornos cementeros. ....	58
5.3 PROPUESTA DE ELEMENTOS CON ENFOQUE DE ECONOMIA CIRCULAR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS Y9+A4060 .....	60
5.3.1 Grupo de elementos de Enfoque en el Ciclo .....	61
5.3.2 Grupo de elementos de Enfoque de Proceso.....	64
6. CONCLUSIONES .....	73
7. RECOMENDACIONES .....	75
BIBLIOGRAFIA.....	76

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de crudos de acuerdo a la Gravedad API.....	17
Tabla 2 Composición aproximada del crudo .....	18
Tabla 3. Biodegradabilidad relativa de los contaminantes orgánicos potenciales de los residuos aceitosos de refinería .....	19
Tabla 4 Normatividad nacional aplicable.....	34

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Demanda mundial de Petróleo por sector .....	15
Figura 2 Esquemas de incineradores.....	21
Figura 3 Economía circular en relación con diversas perspectivas para el desarrollo sostenible. ....	23
Figura 4 Diagrama de Mariposa.....	24
Figura 5 Estructura del Eco-Balance.....	30
Figura 6 Metodología de investigación.....	38
Figura 7 Total de residuos generados a nivel mundial .....	42
Figura 8 Volumen de residuos peligrosos generados reportado por país.....	42
Figura 9 Histórico de generación de residuos peligrosos en Colombia .....	43
Figura 10 Generación de residuos peligrosos por departamento en Colombia. ....	44
Figura 11 Manejo de residuos peligrosos en Colombia.....	45
Figura 12 Aprovechamiento de residuos peligrosos en Colombia.....	45
Figura 13 Disposición final de residuos peligrosos en Colombia.....	46
Figura 14 Tipos de residuos peligrosos generados en Colombia.....	47
Figura 15 Generación residuos Y9+A4060 .....	48
Figura 16 Generación por actividad económica que produce residuosY9+A4060.....	48
Figura 17 Porcentaje de volúmenes de residuos tratados Y9+A4060 .....	49
Figura 18 Volumen de residuos tratados por actividad económica.....	50
Figura 19 Tipo de tratamiento utilizado para los residuos .....	51
Figura 20 Aprovechamiento de residuos Y9+A4060 .....	51
Figura 21 Residuos enviados a disposición final Y9+A4060 .....	52
Figura 22 Balance de disposición y aprovechamiento residuos Y9+A4060.....	53
Figura 23 Enfoque de ciclo .....	62
Figura 24 Eco-Mapa general del proceso de residuos Y9+A4060.....	66
Figura 25 Ejemplo de ítems para elaboración de un Eco-Balance .....	67
Figura 26 Eco-balance general del proceso de residuos Y9+A4060 .....	68

## INTRODUCCIÓN

El modelo lineal encaminado a extraer, transformar, usar y desechar, ha predominado en la economía global desde la revolución industrial. Esto ha traído consigo la degradación del medioambiente por la generación de grandes cantidades de residuos sólidos (RS); que, para el sector industrial, están clasificados en su mayoría como peligrosos (RESPEL), “debido a que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, pueden causar mayor riesgo y daño a la salud humana y al entorno natural” (MAVDT, 2017). Además de esto, el modelo lineal implica la sobreexplotación de recursos naturales finitos, poniendo en riesgo el desarrollo de diversas actividades a futuro.

Al evidenciar las consecuencias causadas por dicho modelo, los países principalmente desarrollados mostraron interés por gestionar de una mejor manera los residuos producidos e iniciaron ajustes de legislación hacia las décadas de 1970 y 1980. En la actualidad muchos países han generado sistemas de gestión que tratan de manera ambientalmente adecuada sus residuos, sin embargo, se debe hacer frente a la necesidad de tratar grandes cantidades de diversos materiales que a menudo generan las grandes industrias que mueven la economía mundial y que por su naturaleza tienen una gestión más compleja.

En Colombia, también se ha demostrado interés en dicha problemática por lo cual se desarrolló el Título 6 del Decreto Único Reglamentario Para El Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (DUR) 1076 de 2015, que genera los lineamientos de todos los procesos de los residuos peligrosos desde prevenir su generación, regular su manejo a través de una buena gestión y aprovechamiento, así como incluir las obligaciones derivadas para proteger la salud humana y el ambiente.

Para realizar una buena gestión es importante conocer el volumen de residuos generados en el país, para lo cual el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) emite desde el año 2005 el Informe Nacional de Residuos Peligrosos en Colombia, del cual se puede determinar que en el país los residuos peligrosos con la mayor generación son de acuerdo a la clasificación los denominados **Y9**- Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua; y **A4060** -Desechos de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua; considerando que IDEAM (2021) determina que “para el año 2011 representaban el 47% del total generado, y diez años después, representan más del 52.5% del total generado en el país”.

Con base en el estado actual de los residuos peligrosos en el país, y teniendo en cuenta que el principal residuo generado está directamente vinculado con una de las industrias que mueven la economía nacional, surge una gran oportunidad a través de la Estrategia Nacional De Economía Circular para tener consumo sostenible y economías más limpias, buscando “el manejo eficiente de materiales, agua y energía; para lograr convertir a Colombia en pionero en temas de procesos y proyectos circulares y así mismo en una de las tres economías más competitivas de América Latina para 2030” (MADS, 2019).

En consideración de lo anteriormente expuesto, este trabajo busca seguir y agrupar las líneas de investigación que se han venido desarrollando en este tema y consolidar elementos que sirvan como base para el aprovechamiento de RESPEL tipo Y9+A4060, con enfoque de economía circular, a través de la propuesta de elementos para el aprovechamiento de dichos residuos y así reducir los costos ambientales y sociales derivados de la gestión actual de los residuos.

### **JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación se enfocará en la identificación de elementos relevantes con enfoque de economía circular para el aprovechamiento de residuos de la industria petrolera, considerando que actualmente en el país son los principales residuos peligrosos generados, pero son pocas las alternativas para su reúso debido a los altos costos de tratamiento y los incentivos económicos para su incorporación a otro ciclo productivo son relativamente nuevas. Este trabajo permitirá desde una perspectiva sostenible, generar proyectos orientados al aprovechamiento teniendo en cuenta elementos como implementación de balances ecológicos y análisis de ciclo de vida para determinar la viabilidad de la incorporación de los mismos a otra actividad económica, estimar costos ambientales de la implementación en otras cadenas productivas y finalmente que la gestión de los residuos Y9+A4060 puede ser eficiente para así evitar la disposición de los mismos en celdas de seguridad que conllevan a incurrir en altos costos ambientales y sociales.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo General**

Proponer elementos para el aprovechamiento de residuos aceitosos de origen petrolero tipo Y9+A4060, considerando el enfoque de economía circular para reducir los costos ambientales y sociales derivados de la gestión actual de residuos.

### **1.2 Objetivos específicos**

- ✓ Conocer las características de los RESPEL tipo Y9+A4060.
- ✓ Analizar el potencial de aprovechamiento de los RESPEL tipo Y9+A4060 de acuerdo con sus propiedades y a partir de la revisión de casos de estudio existentes.
- ✓ Definir las diferentes estrategias e instrumentos para la gestión de este tipo de residuos con un enfoque de economía circular, a través de la revisión de casos de estudio.
- ✓ Proponer elementos para el aprovechamiento de residuos aceitosos de origen petrolero tipo Y9+A4060 en Colombia, considerando el enfoque de economía circular.

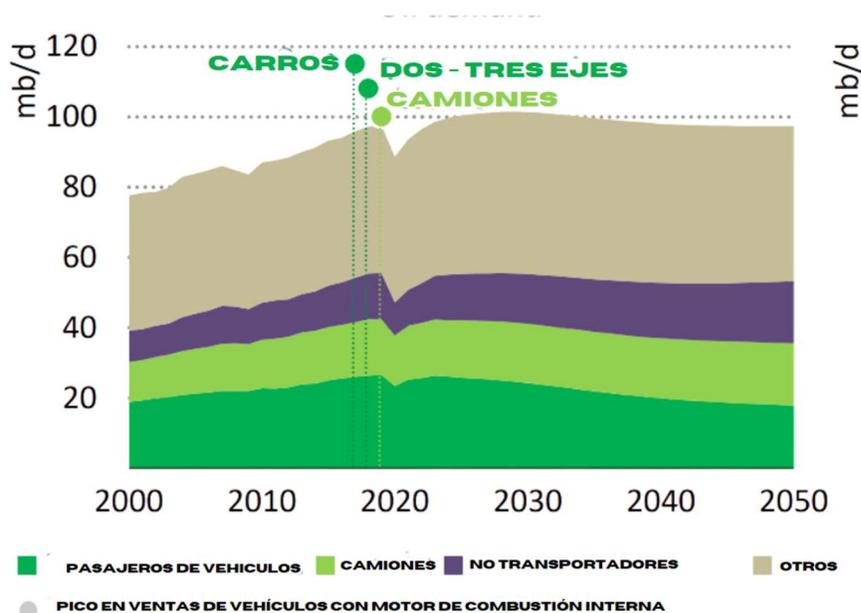
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 RESIDUOS PELIGROSOS DE TIPO Y9+A4060

Los residuos que serán descritos en el presente numeral están definidos de acuerdo con lo estipulado en el convenio de Basilea y en el Anexo I y II del artículo 2.2.6.2.3.6 del decreto 1076 de 20215. Los primeros denominados **Y9** son aquellos que tienen su origen en la industria de Hidrocarburos consideradas como mezclas y emulsiones de desechos de aceites y agua o de hidrocarburos, mientras que los **A4060** son aquellos desechos de las mezclas de emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua.

#### 2.1.1 Origen de los residuos Y9+A4060

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (2023) “en las últimas dos décadas, la demanda de petróleo ha aumentado en 18 millones de barriles por día (mb/d)”. Aunque es importante resaltar que actualmente se está en la búsqueda de energías alternativas que puedan reemplazar o suplir la energía que produce dicho compuesto, la industria de hidrocarburos representa uno de los mayores productores de energía mundial (**Figura 1**).



**Figura 1** *Demanda mundial de Petróleo por sector*

*Fuente: Adaptado de* (Wright, 1986)

Considerando que, en el panorama actual la industria de hidrocarburos es tan relevante, es importante conocer que se originan residuos durante “las operaciones upstream (aguas arriba) que están relacionadas con los procesos de extracción, transporte y almacenamiento de petróleo crudo, como downstream (aguas abajo) que se refiere a los procesos de refinación de petróleo crudo” (Rengifo, 2018).

Para el tratamiento de los residuos provenientes de los procesos de explotación, que inicia con la perforación para extracción del crudo, debido a la mezcla de agua con compuestos aceitosos e hidrocarburo, se genera un proceso de separación de dicha mezcla, para obtener el crudo remanente en dichos residuos y el agua por separado. El agua sobrante es enviada al sistema de tratamiento de agua y los residuos remanentes se someten a un aumento de temperatura, “con el fin de evaporar el agua que queda emulsionada, luego se vuelve a incrementar hasta 160 °C, con el fin de extraer el crudo remanente sin presencia de agua” (Moscoso, 2019). Este volumen evaporado se condensa para luego pasarlo por una centrifuga vertical.

Entre los residuos resultantes de los procesos anteriores, se encuentran los lodos conocidos como borras aceitosas (Residuos Y9 + A4060), los cuales tienen apariencia densa y viscosa y “se generan en tanques de almacenamiento después de largos periodos de tiempo por procesos de sedimentación y aglomeración de hidrocarburos (HCs) y diferentes sólidos (p.e, arena, sulfuros, asfalto)” (Rengifo, 2018).

### **2.1.2 Composición de los residuos Y9+A4060**

De acuerdo con varias investigaciones realizadas a los residuos Y9 + A4060, estos se forman por sedimentación y aglomeración de compuestos hidrocarbonados especialmente de cadenas más largas (parafínicos y asfaltenos), compuestos de azufre, óxidos metálicos, gases disueltos, sedimentos (rocas, arena, lodos de perforación, entre otros), materia orgánica y agua. Los mismos pueden ser clasificados de diferentes maneras, una de ellas es por su composición (cantidad y tipo de componentes), la otra está relacionada con la densidad API (American Petroleum Institute) que “es una medida de densidad que describe que tan pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua a través de la medición con un instrumento denominado hidrómetro”. (Windman Internacional, 2018)

Para que se entienda mejor, si una fracción de petróleo flota en otra, significa que es más liviana, y por lo tanto su gravedad API es mayor, si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en esta.

Considerando la importancia del tipo de crudo para poder identificar los compuestos de la borra, a continuación, se describen los diferentes rangos de la densidad API del hidrocarburo, para así determinar la cantidad de sustancia que lo componen y de igual forma su grado de degradación. En ese orden, “a mayores valores de grados API, un crudo es más liviano y por tanto está compuesto de sustancias de baja densidad, por el contrario, a menores valores, el crudo resulta ser más pesado y por ende más difícil de degradar” (Nandakumar & Jayanthi, 2016)

De acuerdo a los grados API el crudo se puede clasificar como se muestra en el siguiente cuadro, el cual fue tomado de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía:

**Tabla 1 Clasificación de crudos de acuerdo a la Gravedad API**

<b>°API</b>	<b>DENSIDAD (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>TIPO DE CRUDO</b>
>31,1	<870	Liviano
22,3-31,1	920-870	Medio
10-22,3	1000-920	Pesado
<10	>1000	Extrapesado

**Fuente:**(Gómez & Gómez, 2016)

Finalmente, y de acuerdo con algunos estudios realizados se puede obtener una aproximación de la proporción de componentes en las borras (**Tabla 2**), resaltando que depende de las características del crudo de cada lugar donde ha sido extraído como se mencionó anteriormente, las cuales a su vez dependen de los compuestos con que ha sido formado.

**Tabla 2 Composición aproximada del crudo**

Elemento	Porcentaje (%)
Carbono	83-87
Hidrogeno	11-14
Oxigeno	0-5
Azufre	0-6
Nitrógeno	0-0.05
Compuestos Inorgánicos	0 – 0.01

Fuente: (Valbuena Rojas & Sierra Gonzáles, 2015)

### 2.1.3 Riesgo de los residuos, tratamientos asociados y disposición final

Debido a su origen y componentes los residuos Y9 + A4060 o también conocidos como borras tienen un riesgo alto para la salud humana y el medio ambiente, ya que de acuerdo con su ficha de seguridad son inflamable y pueden ser nocivos por inhalación, por contacto con la piel o por ingestión.

Dentro de sus compuestos se encuentran hidrocarburos aromáticos de bajo peso molecular como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), que son compuestos volátiles que causan irritación respiratoria y afectan el sistema nervioso central. Además, el benceno es conocido por causar leucemia en humanos, y el tolueno es teratogénico, es decir, puede causar un defecto congénito durante el embarazo al feto.

También existen compuestos de especial interés como los Hidrocarburos Aromatices Policíclicos (HAPs), ya que están conformados por anillos aromáticos fusionados en arreglos lineales, angulares o de grupo, lo cual genera que sean de alta estabilidad química, y como lo menciona Moscoso (2019) debido a “la cantidad de anillos aromáticos su potencial de carcinogenicidad aumenta y la hidrofobicidad hace que sean especialmente afines con los lípidos estructurales de los seres vivos”.

Para identificar la biodegradabilidad de los compuestos peligrosos típicos presentados en las borras se presenta la **Tabla 3** , mostrando la complejidad de su manejo, ya que la mayoría de ellos tienen una tasa lenta de biodegradabilidad y otros llegan a ser recalcitrantes.

**Tabla 3. Biodegradabilidad relativa de los contaminantes orgánicos potenciales de los residuos aceitosos de refinería**

BIODEGRADACIÓN	COMPUESTOS	EJEMPLOS
Rápida	Alifáticos volátiles Aromáticos volátiles Alifáticos pesados y Aromáticos	Alquenos y alcanos Benceno y tolueno Alcanos saturados e hidrocarburos cíclicos
Intermedia	Hidrocarburos volátiles	Clorados o bromados
Lenta (Hidrocarburos aromáticos)	Polinucleares	Pyreno
Recalcitrantes	Residuales	Asfaltos, asfaltenos y ceras parafínicas

Fuente: (Eche, 2003)

Las borras se pueden presentar en tres fases, como se mencionó al inicio del capítulo: fase aceite, fase acuosa y fase sólidos; y que de acuerdo con ello se puede considerar la eficiencia y el grado de especialización del tratamiento, los procesos pueden estar clasificados en: tratamiento primario, secundario y terciario.

Dentro de los métodos de disposición final más utilizados por las empresas de la industria petrolera, se encuentra la biorremediación y la incineración, los cuales se describen brevemente a continuación:

- **Biorremediación.** Consiste en la eliminación de contaminantes usando microorganismos. Es un proceso complejo que debe tener en cuenta aspectos de la naturaleza y cantidad de contaminantes, las condiciones locales y la composición de la comunidad microbiana autóctona. Para el caso de los hidrocarburos, la biorremediación del suelo, es el usado ya que se puede controlar la tasa de degradación, pero necesita cierta preparación para asegurar que la escorrentía y la lixiviación no extiendan los contaminantes. “Los hidrocarburos se aplican al suelo para conseguir una concentración del 5% entre los 15 a 20 cm superiores del suelo;

por encima del 10% se inhiben los procesos de biodegradación”(VALBUENA ROJAS & SIERRA GONZÁLEZ, 2015).



**Fotografía 2-1 Biorremediación realizada en la serranía de las Quinchas, Puerto Boyacá.**

**Fuente:(EOM LATAM, 2023)**

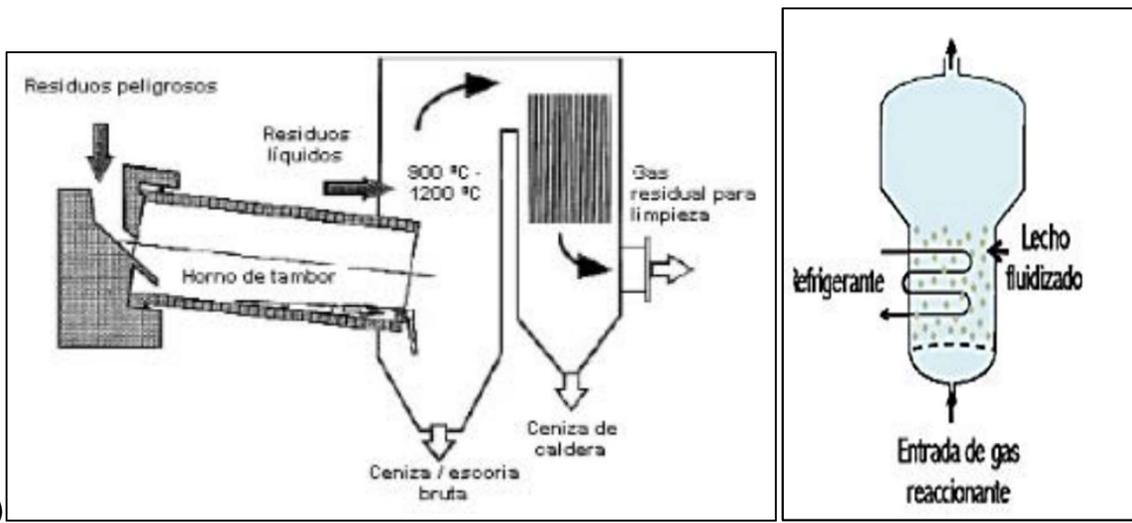
Estos límites de concentración se traducen de acuerdo a Suarez (2011) “en que por cada 100 mil litros de hidrocarburos se necesita una hectárea de tierra”. Del mismo modo, se debe ajustar pH de conformidad con la necesidad de los microorganismos así como los nutrientes principales en relación N:P:K.

- **Incineración:** Este método tiene como principio la combustión controlada de los residuos, transformándolos en materiales no combustibles, inodoros, homogéneos e inertes. “La incineración consiste en la oxidación exotérmica rápida de los compuestos combustibles, diseñados para que los gases de combustión alcancen temperaturas en el rango de 850 a 1600 °C, con un tiempo de estadía de al menos 2 segundos (Díaz & Puyo, 2021). A través de este método se reduce el volumen de los residuos, pero se generan emisiones principalmente de compuestos orgánicos volátiles (COVs)” (Moscoso, 2019).

Dentro de los incineradores, se encuentran los de horno rotatorio (**Figura 2**) que cuentan con cámaras cilíndricas recubiertas de refractarios, con una leve inclinación horizontal y que rotan a una velocidad constante (Díaz & Puyo, 2021). Este diseño

permite que los residuos se desplacen mezclándose a través del horno, y al ser descargados se conecten con una cámara de postcombustión que cuenta con quemadores que elevan y mantienen la temperatura por el tiempo requerido de contacto. La versatilidad de residuos que este incinerador puede procesar, lo hace uno de los más comunes del mercado.

Otro tipo de incinerador que se utiliza con este método es el denominado de lecho fluidizado (**Figura 2**) que es un depósito vertical cilíndrico de acero revestido con material refractario, que contiene un lecho de arena y orificios para alimentar aire para la producción y mantenimiento de combustión continua. En este caso el proceso se caracteriza por realizar la combustión a través de un material inerte que puede contener arenas, cenizas y otro material.



**Figura 2 Esquemas de incineradores**

**Fuente:** ( UBA, 2001) y (Carrasco & Rodríguez Mondragón, 2022)

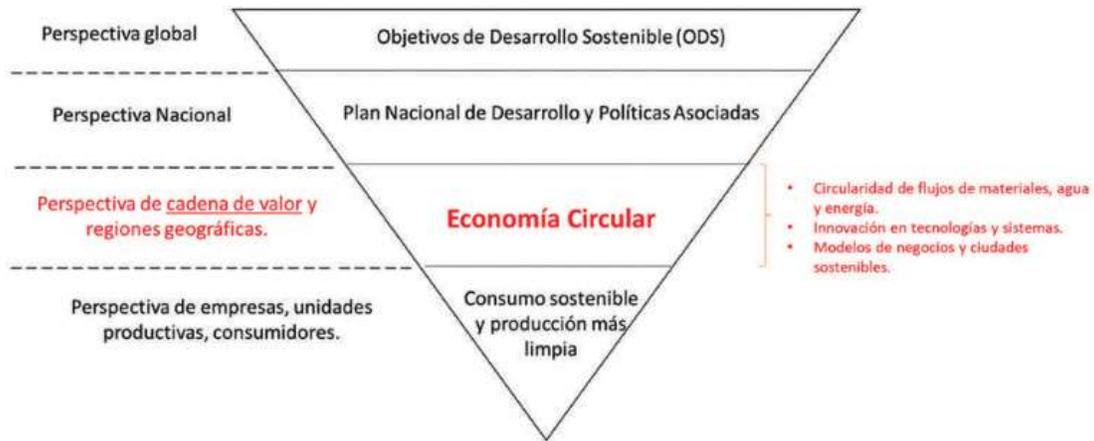
El limitante de este tipo de incinerador en el procesamiento de residuos peligrosos es la sensibilidad que puede presentar el material inerte con los hidrocarburos presentes en este tipo de RESPEL, por lo cual su uso es más limitado en el sector económico.

## 2.2 ECONOMIA CIRCULAR: PRINCIPIOS Y ELEMENTOS

Organizaciones como las Naciones Unidas generaron para el año 2015 los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como una iniciativa para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Dentro de dichos objetivos se tienen tres de importancia ambiental y de enfoque industrial que son: industria, innovación e infraestructura (objetivo 9), producción y consumo responsable (objetivo 12), y finalmente acción por el clima (objetivo 13).

Teniendo en cuenta principalmente los objetivos doce y trece, enfocados a la producción y consumo responsable y la acción por el clima, se puede entender que el consumo y la producción sostenibles consisten en producir en mayor cantidad y mejor calidad requiriendo menos insumos. También se trata de desvincular el crecimiento económico de la degradación medioambiental, aumentar la eficiencia de recursos y promover estilos de vida sostenibles (ONU, 2020). Así mismo el consumo y la producción sostenibles también pueden contribuir de manera sustancial a la mitigación de la pobreza y a la transición hacia economías verdes y con bajas emisiones de carbono.

Es a través de estos dos objetivos, que los países a nivel mundial deciden iniciar una transición definitiva hacia modelos ya no lineales, sino circulares. Dichos modelos, se basan en el análisis y optimización de flujos de materiales y energía, así como una simbiosis industrial que promueve que los residuos de una industria sean utilizados como materia prima para otra (MADS, 2019). Todo con el fin de promover el crecimiento verde para proponer líneas de acción y modelos concretos para la transformación de sistemas de producción y consumo, como motores del desarrollo. La **Figura 3** resume los diversos conceptos y modelos que han surgido a lo largo de los años como perspectivas que reconocen la necesidad del uso eficiente de recursos.



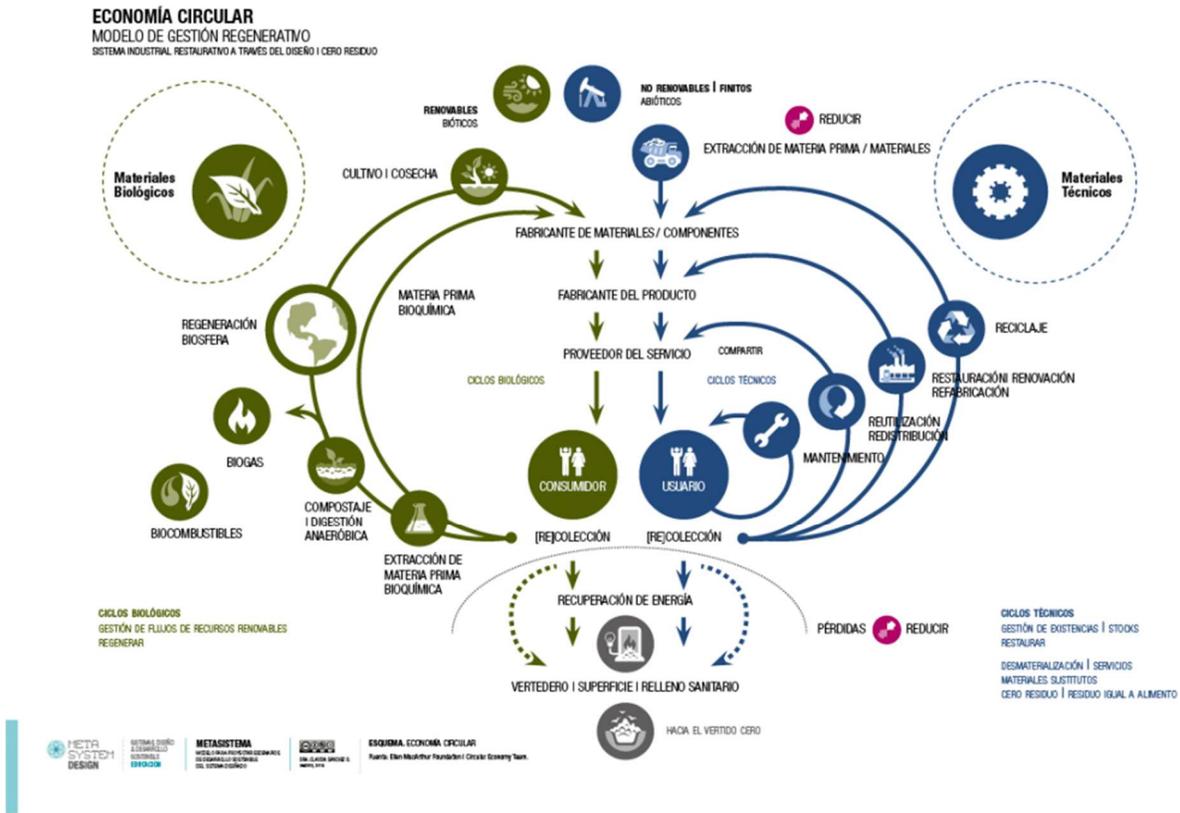
**Figura 3 Economía circular en relación con diversas perspectivas para el desarrollo sostenible.**

**Fuente: Van Hoof, 2019.**

Es justamente a través de dichos modelos de economía circular, que se han generado diversos proyectos a nivel mundial, que no solo han generado innovación tecnológica sino una visión diferente de lo que la industria estaba acostumbrada a concebir como desarrollo. Compañías reconocidas como Google, Renault, H&M, Unilever, Phillips y Speedo han generado proyectos y políticas dentro de su funcionamiento enmarcadas justamente en la economía circular como lo son la disminución en emisiones, el reúso de residuos y equipos en otras industrias, los trajes de baños a partir de residuos textiles, los tapetes en partes de motor y la extensión de la vida útil de los productos.

### 2.2.1 Diagrama de la mariposa

La fundación Ellen Mc Arthur (2021), pionera en economía circular y diseñadora del diagrama de mariposa “ilustra el flujo continuo de materiales en una economía circular” muestra que en la naturaleza existe un ciclo principal llamado “Ciclo biológico” donde la materia prima de los procesos es natural y por ende es posible que sea devuelta a su origen aportando nutrientes y regenerarse de manera orgánica; y un “ciclo técnico” relacionado con las actividades antrópicas o industriales, el mismo se vuelve complejo pues se introducen materiales no renovables que hacen imposible que pueda devolverse a su origen sin que este se vea afectado.



**Figura 4 Diagrama de Mariposa**  
**Fuente: Fundación Ellen MacArthur, 2021.**

➤ *Ciclo Biológico*

El ciclo biológico de acuerdo con la **Figura 4** contiene únicamente dos bucles que tienen que ver con materia prima bioquímica y regeneración en biosfera.

El primer bucle se relaciona con actividades que pueden ser recirculadas de manera directa como materia prima de la tierra, “el segundo se relaciona con procesos adicionales que permiten transformar esos residuos en materia prima pero que no representan un riesgo que evite que puedan ser reusados en procesos que impliquen contacto con seres vivos” (Ellen McArthur Foundation, 2021).

El cambio de ciclos lineales a circulares, implica un aprovechamiento de residuos que pueden contener energía y nutrientes que están siendo desperdiciados por llevar directamente a disposición final a relleno sanitario. Los materiales son renovables por

naturaleza, pero pueden crear más valor al conectarlos en cascada para aplicaciones adicionales en diferentes cadenas de valor.

➤ *Ciclo Técnico*

De acuerdo con la **Figura 4** el ciclo técnico considera cuatro bucles: mantenimiento-reparación, reutilización, restauración y reciclaje, esto se debe a la complejidad que conllevan los diferentes escenarios industriales principalmente.

El primero, relacionado con el rediseño de toda la cadena de valor y ciclo de vida del producto, que tiene como finalidad “producir elementos que puedan mantenerse, para así alarga la vida útil de procesos y productos considerando que el mantenimiento es la forma de conservar en el ciclo a los productos y evitar residuos derivados de su disposición”(EMF, 2022).

El segundo bucle se trata de la reutilización o redistribución, encaminado a introducir como materias primas los residuos para darles una segunda vida o uso, este puede relacionarse de acuerdo con Ellen Mc Arthur (2022) en “implementar tratamientos primarios que pueden transformar los residuos o materia prima de otros productos y volver a entrar al ciclo de recirculación”.

El tercer bucle está relacionado con restauración-renovación-refabricación, que trae muchos beneficios ya que no busca darles un nuevo uso a los productos ni enviar a disposición final, en lugar de ello se da la renovación y/o refabricación para introducir al ciclo en el punto donde fue creado.

El ultimo bucle, es el más conocido, y se trata de reciclar que es básicamente “mantenerse en el ciclo a través de los materiales que lo componen lo que implica procesos de separación, tratamiento y transformación que pueden conllevar otros ciclos de producción”(Rosario & Roman, 2012). Sin embargo, se busca que cuando se considere producto residuo se pueda llevar a ser parte de este ciclo y así evitar su disposición directa en relleno sanitario.

### 2.2.2 Principios de la economía circular

El modelo de economía circular que actualmente se quiere implementar, parte de tres principios fundamentales, que se centran en el diseño no solo de estrategias sino de repensar la forma y modo en que se están generando materias primas que al final pueden convertirse en residuos.

Dentro de los mismos se encuentran:

- **Promover la efectividad del sistema, haciendo patentes y proyectando eliminar las externalidades negativas.**

Cambiar la mentalidad productiva actual, pensando que los residuos generados pueden estar relacionados con defectos en el proceso productivo que hace que tenga vida útil corta y no pueda ser valorizado en un ciclo productivo. Así mismo, proyectando la eliminación de externalidades negativas, considerando el origen de algunas materias primas en las salidas de otros procesos a través de tratamientos.

Si se evalúa el ciclo de vida de los procesos y finalmente el de los residuos se podrán encontrar que sistemas como los rellenos sanitarios traen externalidades negativas, que de acuerdo con Ayres (2012) “son los impactos que de manera negativa afectan diferentes matrices de índole abiótica, biótica y socioeconómica”. Algunos ejemplos pueden ser vectores biológicos, contaminación visual y auditiva, emisión de olores ofensivos, cambios en el uso de la tierra, entre otros.

Es importante resaltar que este principio parte del diseño en el origen, replanteando el ciclo de vida de los productos para detener la generación de residuos y el uso de una sola vez de materiales.

- **Optimizar el rendimiento de los recursos, circulando siempre productos, componentes y materiales en su nivel más alto de utilidad, en los ciclos técnico y biológico.**

Considerando que la tierra es un planeta con recursos finitos y sistemas equilibrados, que por actividades antrópicas se han visto afectados, el objetivo de este principio es buscar “el

equilibrio entre el uso de materiales necesarios para las diferentes actividades industriales con la incorporación de recursos renovables”(Ellen McArthur Foundation, 2021).

El reto de este principio está en que los productos actualmente no pueden circular en ciclos diferentes a los propios e incluso en algunos casos ni siquiera en sus propios ciclos lo que al final termina en generación de residuos por materiales de un solo uso, del mismo modo la combinación de materiales técnicos y biológicos no permite su separación para recirculación, por lo tanto la circularidad que se busca en los ciclos productivos debe iniciar desde su rediseño en combinación que permita que al final de su uso puedan ser introducidos a nuevos ciclos y no sea más costoso que disponerlos.

- **Preservar y aumentar el capital natural, controlando los stocks finitos y equilibrando los flujos de recursos renovables.**

Al modificar la economía de un modelo lineal a uno circular, se cambia el enfoque de extracción a regeneración, ya que, en lugar de degradar continuamente la naturaleza, conservamos capital natural. Lo anterior puede generarse al emplear prácticas agrícolas que permiten que la naturaleza reconstruya los suelos, lo que aumenta la biodiversidad, y devuelva materiales biológicos a la tierra.

En este cambio de enfoque, se deben considerar dos actores involucrados, el primero está relacionado con el capital natural y el segundo el capital manufacturado. Así mismo, al hablar de sostenibilidad de un sistema hay que tener claro cuál es el objetivo, “ya que a veces se puede mostrar interés en sostener parte del producto, pero cambiar el sistema, otras veces puede ser mejorar o transformar el sistema para mejorar algunos de sus productos” (Gallopín, 2003).

El análisis de cómo llevar un sistema hacia la sostenibilidad, de acuerdo a lo anterior, debe considerar cual es el enfoque principal que se quiere tener, a continuación, se describirán los tres principales de acuerdo a Gallopín (2003):

- **Sostenibilidad del sistema humano:** En este caso el enfoque es cien por ciento antropocéntrico, la sostenibilidad de los sistemas ecológicos reviste importancia sólo en la medida en que sea necesaria para la sostenibilidad del componente humano.

- Sostenibilidad del sistema ecológico: Para este caso, el enfoque es biocéntrico donde los recursos que se agoten producirán una pérdida irreversible al medio físico y bienestar social y por ende prima su conservación.
- Sostenibilidad del sistema socio-ecológico: La visión del sistema como un todo, es decir que está conformado en concordancia con lo referido por el autor Gallopín por un componente (subsistema) societal (o humano) en interacción con un componente ecológico (o biofísico). Lo anterior considera que se debe mantener mínimos de cada subsistema para conservar en equilibrio el sistema general. Se cataloga como una sostenibilidad fuerte.

Desde la perspectiva actual de economía y desarrollo y de acuerdo a la visión de sostenibilidad expuesta anteriormente, la sostenibilidad considerada desde un punto socio-ecológico es lo que busca el tercer principio de la economía circular, entendiendo la importancia de cada subsistema y entendiendo que “las soluciones que limiten el desarrollo económico o impliquen la exclusión social dejan de ser sostenibles”, se trata de conservar el capital natural sin dejar de lado el capital manufacturado que requiere la sociedad.

### **2.2.3 Herramientas de circularidad**

Para el planteamiento y la implementación de la economía circular, se han desarrollado una serie de herramientas que permiten generar un proceso de evaluación y generar resultados más viables, identificando puntos críticos en el diagrama de mariposa.

#### **➤ Eco-Mapa**

El objetivo del Ecomapa es hacer un inventario gráfico cualitativo de prácticas y problemas mediante el uso de mapas, íconos, y figuras, para hacer un diagnóstico sobre los recursos y operaciones de una actividad. El desarrollo del Eco-Mapa es el primer paso para hacer una revisión general del proceso, identificar puntos de interés, y trazar el punto de partida para seguir en la consecución de información para la búsqueda de alternativas de economía circular. Adicionalmente, los Eco-Mapas, “ más allá de ser una primera revisión ambiental, ayudan a tener una idea de las prioridades ambientales a tener en cuenta” (Acosta-Melo & Rosso-Hoyos, 2019).

Los insumos requeridos para elaborarlos son:

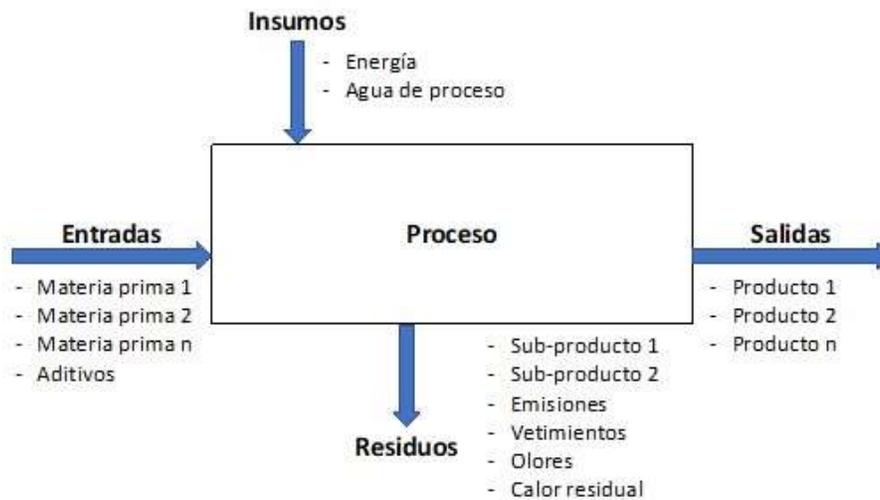
- a) Mapa de proceso
- b) Una estimación global del tipo de recursos utilizados y salidas de los procesos operativos.
- c) Una leyenda de iconos que representan los recursos priorizados.

Dicha herramienta es una aproximación a la realidad de aplicación de la circularidad en las industrias, ya que mapea todo el proceso y los insumos de este, por lo tanto se puede determinar en qué punto del mismo existen mayores oportunidades de mejora y de aplicación de los principios descritos anteriormente.

#### ➤ **Eco-Balance**

El Eco-Balance es la segunda herramienta después del Eco-Mapa en la secuencia de aplicación para desarrollar iniciativas de Economía Circular. “Su objetivo es determinar las cantidades de las entradas y salidas, tales como las materias primas, insumos, productos, subproductos y residuos de dicha operación” (Acosta-Melo & Rosso-Hoyos, 2019). Al obtener esta información, se visualiza lo que ocurre en el proceso de transformación y se calcula la eficiencia del proceso.

El principio fundamental de dicha herramienta es la segunda ley de la termodinámica que cita que la materia no se crea ni se destruye, solo se transforma. En la **Figura 5** se presenta la estructura básica del Eco-Balance, en la cual se describe un esquema general del proceso. Es importante tener en cuenta que dicho balance tiene como objetivo lograr la coevolución del proceso con sus entradas y salidas para luego como lo plantea Gallopin (2003) “tratar de mantenerlo en él mediante una gestión adecuada”.



**Masa entradas del proceso = Masa salidas del proceso**

**Figura 5 Estructura del Eco-Balance**

**Fuente: Van Hoof Bart, 2022**

➤ **Métricas circulares**

Para poder llevar de manera clara el desarrollo de un proyecto, se tienden a desarrollar métricas que puedan dar una noción de diferentes aspectos del mismo durante su ejecución.

Una de las herramientas más utilizadas son los indicadores debido a que “consolidan de manera sencilla la información ya que son específicos por tema y pueden ser categorizados en económicos, ambientales y sociales” (Colombia Productiva, 2015). Por lo tanto, el uso de los mismos con el objetivo de dar viabilidad a alguna alternativa de economía circular para la industria es muy importante, ya que con esto se puede facilitar la toma de decisiones y seguimiento de resultados.

En el caso de las estrategias o proyectos de índole circular, de acuerdo a la fundación Ellen McArthur (2021) existen tres tipos de indicadores relevantes:

- a) Indicadores económicos: Proporcionan mediciones del aumento de la productividad en la empresa, y a la vez, de su competitividad.

- b) Indicadores ambientales: Se enfocan en los recursos ahorrados, disminuidos, y riesgos reducido, su aplicación permite observar en el eco balance las diferencias de flujo con la aplicación de nuevas alternativas de circularidad.
- c) Indicadores sociales: Tiene como objetivo considerar el efecto a nivel social de la aplicación de diferentes alternativas circulares, en términos de empleabilidad, transferencia de conocimientos y transformación de costos.

### 3. MARCO NORMATIVO APLICABLE

#### 3.1 Normatividad internacional

La revisión del marco normativo internacional tiene una gran importancia en la proyección de los diferentes proyectos que pueden surgir del aprovechamiento de residuos peligrosos a través de la economía circular, ya que al estar en concordancia con los mismos pueden desarrollarse en diferentes países.

➤ **Objetivos de desarrollo sostenible: Agenda 2030**

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en el marco de la agenda 2030, se desarrollaron 17 objetivos en total por las Naciones Unidas en el 2015 como un llamado a la acción contra diferentes problemáticas socioeconómicas y ambientales del planeta.

Ahora bien, de acuerdo a lo planteado por la ONU en 2018 en su agenda 2030, se identificaron 3 objetivos que se relacionan con el desarrollo de estrategias aplicables a el objetivo de la presente investigación los cuales se enuncian a continuación:

- **Objetivo 9 Industria, Innovación e infraestructura:** Este objetivo tiene dos metas específicas de interés para la presente investigación: la primera es “modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales”(ONU, 2019a), y que a través del desarrollo del análisis de potencial de aprovechamiento de los RESPEL tipo Y9+A4060 de acuerdo a sus propiedades se busca dar cumplimiento.

La segunda es “aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, fomentando la innovación y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo”(ONU, 2019); para lo anterior se plantea la propuesta de elementos para el aprovechamiento que abre un camino de investigación hacia la búsqueda de nuevas tecnologías y procesos industriales para llegar a la sostenibilidad del sistema.

- **Objetivo 12 Consumo y producción responsable:** Dentro de las metas planteadas por la ONU, que presentan mayor relevancia para esta investigación se encuentran:
  - De aquí a 2030, 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 significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.
  - De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

Dichas metas, se encuentran en el marco de desarrollo del presente trabajo, considerando que el objetivo general y los específicos planteados se desglosan en torno a la búsqueda de elementos que permitan el aprovechamiento de los residuos Y9+A4060 para evitar su disposición final.

- **Objetivo 13 Acción por el cambio climático:** Las metas propuestas para este ODS se plantean de manera general y amplia, sin embargo, existe una específicamente a la cual se puede aportar desde esta investigación y está relacionada con “Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”(ONU, 2019a). En el marco de desarrollo de elementos de aprovechamiento en torno a la economía circular, se busca implementar parte de la estrategia planteada por el gobierno nacional y que aportaría a generar productos de valor para la reducción de emisiones y por ende al efecto de cambio climático.

➤ **Convenio Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación.**

El Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación entró en vigor en el año 1992, el mismo vela por la aplicación de controles estrictos desde el momento de la generación de un desecho peligroso hasta su almacenamiento, transporte, tratamiento, reutilización, reciclado, recuperación y eliminación final.

Del mismo modo, obliga a las partes a asegurar que los residuos peligrosos y otros desechos se manejen y eliminen de manera ambientalmente segura. Así mismo, protege la salud de las personas y el ambiente de los efectos adversos que los mismos puedan traer durante la generación, transporte y manejo de los residuos de esta clasificación.

➤ **Protocolo de Montreal sobre las sustancias agotadoras de la capa de ozono**

El Protocolo de Montreal es un acuerdo ambiental internacional aprobado en 1987 y que entró en vigor el 1 de enero de 1989, el cual fue creado para proteger la capa de ozono, su objetivo es lograr que las partes promuevan la cooperación mediante observaciones sistemáticas, investigación e intercambio de información sobre los efectos de las actividades humanas en la capa de ozono, y que estas adopten medidas legislativas o administrativas contra las actividades que puedan tener efectos adversos sobre la capa de ozono.

“En Colombia este Protocolo se aprobó mediante la Ley 29 de 1992. A nivel nacional, la Unidad Técnica de Ozono (UTO) del Minambiente se encarga de la implementación del Protocolo de Montreal”(Política Ambiental Para La Gestión Integral de Residuos Peligrosos y Plan de Acción 2022-2030, 2022).

### 3.2 Normatividad nacional y regional

En la Tabla 4, se presenta el marco normativo aplicable a nivel nacional y regional. Para ello se tuvieron en cuenta las temáticas relacionadas con la ejecución de la presente investigación y así mismo se relacionó con leyes, decretos, resoluciones y políticas públicas que rigen la normatividad colombiana respecto a la temática desarrollada.

**Tabla 4 Normatividad nacional aplicable**

TIPO DE NORMA	IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA	1991	Art. 80 El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

TIPO DE NORMA	IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
LEY	253 del 9 de enero de 1996	Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989.
	1252 del 27 de noviembre de 2008	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones
DECRETO	4741 del 30 de diciembre de 2005	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
	1076 del 26 de mayo de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible; Título 6 que tiene por objeto prevenir la generación de residuos o desechos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos o desechos generados, con el fin de proteger la salud humana y el ambiente.

Fuente: Autor, 2023

### 3.3 Otras disposiciones

Existen otros documentos de consulta, que, si bien no son considerados de obligatorio cumplimiento, pueden servir como guías para desarrollar proyectos relacionados con la temática de investigación del presente documento.

#### ➤ **Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES)**

Los documentos CONPES, de acuerdo a “plasman las decisiones de política pública aprobadas por el consejo y en este sentido constituyen una de las principales herramientas para su formulación e implementación”(MADS, 2011).

Es importante aclarar que los documentos CONPES carecen de efecto vinculante dado que “el consejo es de carácter supra ministerial, y sin personería jurídica, y por ende sus actuaciones no tienen capacidad jurídica para crear o para ser sujeto de obligaciones” (DNP, 2011).

- **CONPES 3918 de 2018: Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) En Colombia**

Los objetivos de la estrategia planteada en el CONPES 3918 están enmarcados en definir “el seguimiento de avances en la implementación de los ODS, definir un plan de fortalecimiento en la producción y manejo de datos, así como establecer las líneas estratégicas del Gobierno nacional con los gobiernos locales”(DNP, 2018). Todo lo anterior, para materializar el enfoque multiactor de la Agenda 2030, y la definición de alianzas y participación en la implementación y control social a través de ejercicios de rendición de cuentas.

- **CONPES 3874 de 2016 Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos**

Esta política, se compone de dos ejes estratégicos propuesto por el Departamento Nacional de Planeación (2016): el primer eje busca “adoptar medidas encaminadas hacia la prevención, minimización y promoción de reutilización de residuos sólido y evitar la generación de gases de efecto invernadero”. Como complemento, el segundo eje apunta a mejorar la cultura ciudadana, la educación e innovación en gestión integral de residuos sólidos para incrementar los niveles de separación en la fuente, de aprovechamiento y de tratamiento.

- **CONPES 3700 de 2011: Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia**

La Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de cambio climático en Colombia la necesidad que tiene el país de actuar frente a este fenómeno comprendiéndolo como una problemática que influye tanto en el desarrollo económico como social.

En ese sentido, “busca generar espacios para que los sectores y los territorios integren dicha problemática dentro de sus procesos de planificación, articular a

todos los actores para hacer un uso adecuado de los recursos, disminuir la exposición y sensibilidad al riesgo, aumentar la capacidad de respuesta y preparar al país para que se encamine hacia la senda del desarrollo sostenible, generando competitividad y eficiencia”(CONPES, 2011).

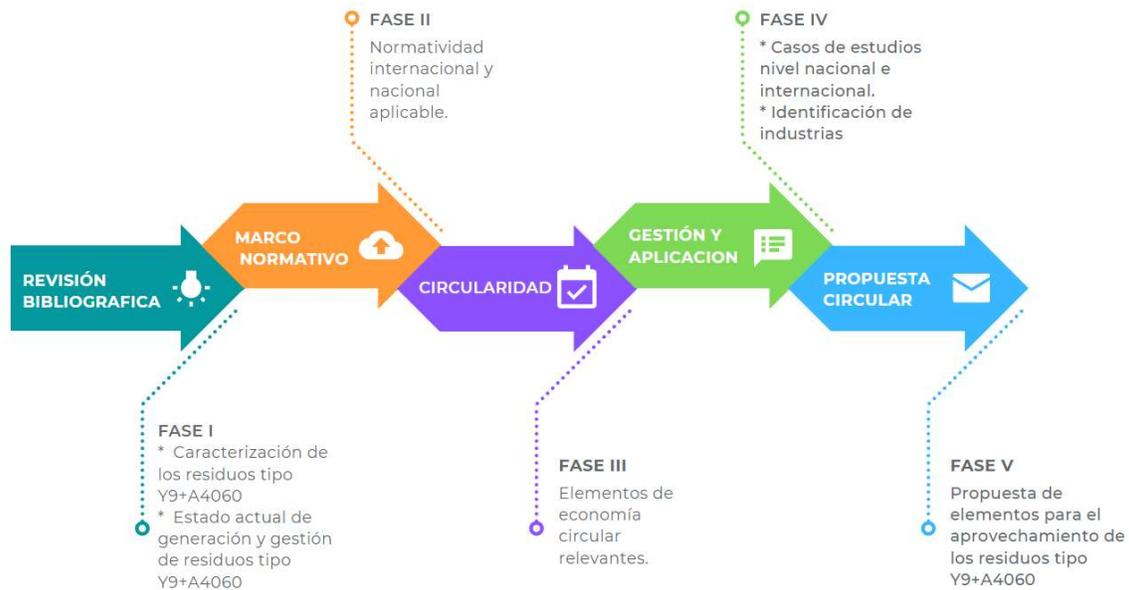
➤ ***Estrategia nacional de Economía Circular ENEC***

La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) es una apuesta del gobierno nacional que invita a repensar nuestro modelo de desarrollo, en línea con la propuesta del Plan Nacional de Desarrollo “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad”. La consigna de “producir conservando y conservar produciendo, ha impuesto un reto como sociedad, pues es un cambio de paradigma que permitirá migrar hacia un enfoque de eficiencia en el uso de los recursos considerando un enfoque sociobiológico”(MADS, 2019)

La misma, propende por un nuevo modelo de desarrollo económico que incluye la valorización continua de los recursos, el cierre de ciclos de materiales, agua y energía, la creación de nuevos modelos de negocio, la promoción de la simbiosis industrial y la consolidación de ciudades sostenibles, con el fin, según el MADS (2019) de “optimizar la eficiencia en la producción y consumo de materiales, y reducir la huella hídrica y de carbono”.

## 4. METODOLOGIA

La metodología utilizada en el trabajo presentado se basó en la revisión bibliográfica de la caracterización de residuos de interés, exploración de la normatividad y elementos de economía circular, definición de la gestión, estado actual y aplicación de los residuos y finalmente definición de una propuesta aplicable al aprovechamiento de residuos Y9+A4060. Se desglosa en las siguientes fases:



**Figura 6 Metodología de investigación**

**Fuente: Autor,2023**

A continuación, se presentan las actividades desarrolladas a lo largo de cada una de las fases mencionadas en la **Figura 6**.

### 4.1 Caracterización de los residuos tipo Y9+A4060

Recopilación de información bibliográfica referente a caracterización y potencial de aprovechamiento de los residuos tipo Y9+ A4060. Dentro de esta revisión se incluyeron artículos científicos, diferentes investigaciones, trabajos adelantados, informes nacionales e internacionales de RESPEL y la identificación del potencial de aprovechamiento a partir de las propiedades y características de estos RESPEL.

## **4.2 Estado actual de generación y gestión de residuos tipo Y9+A4060**

Revisión de la generación actual de los RESPEL tipo Y9+A4060, a través de cifras sobre el estado y tendencias en Colombia. Revisión del estado y tendencias de la gestión de los RESPEL tipo Y9+A4060, incluyendo cantidades anuales y continuidad en la generación. Análisis del potencial de aprovechamiento a partir de cifras sobre la generación de estos RESPEL.

## **4.3 Elementos de economía circular**

Identificación de elementos esenciales que debe contener una solución de aprovechamiento enmarcada en un esquema de economía circular teniendo en cuenta el enlace con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) planteados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Para esto, se revisaron documentos de referencia a nivel nacional e internacional.

## **4.4 Marco normativo aplicable**

Revisión del marco normativo, incluyendo legislación aplicable vigente, existencia de guías técnicas y normativa de referencia, aplicables a la gestión de RESPEL y a la implementación de esquemas de economía circular en Colombia.

## **4.5 Casos de estudio a nivel nacional e internacional.**

Revisión de casos de estudio a nivel nacional e internacional tanto investigativos como aplicados, para identificar posibles opciones de aprovechamiento. En la revisión de casos de estudio relacionados con el aprovechamiento de RESPEL tipo Y9+A4060 se buscó identificar elementos tales como ventajas económicas, ambientales y sociales, industrias relacionadas, usos propuestos y funcionalidad de las alternativas y su contribución en la reducción de disposición final.

## **4.6 Identificación de industrias con usos potenciales de RESPEL tipo Y9+A4060**

Para la definición de la propuesta de elementos de aprovechamiento en el marco de un esquema de economía circular, se realizó una revisión de las industrias que podrían recibir como insumo los residuos Y9 + A4060 para aprovechamiento, incluyendo tanto el uso que podría darse, como el estado en el que se requiere recibir estos RESPEL para su aprovechamiento.

#### **4.7 Propuesta de elementos para el aprovechamiento de los residuos tipo**

##### **Y9+A4060**

Propuesta de elementos para el aprovechamiento de los RESPEL tipo Y9+A4060, a partir de la información sobre el contenido mínimo de un esquema de economía circular, sobre las industrias que potencialmente podrían recibir este tipo de RESPEL en Colombia, información sobre las cantidades generadas y continuidad de generación, entre otros. Identificación de consideraciones y retos asociados al aprovechamiento de RESPEL tipo Y9+A4060 dentro del marco de un esquema de economía circular.

## 5. RESULTADOS Y CONTRIBUCIÓN

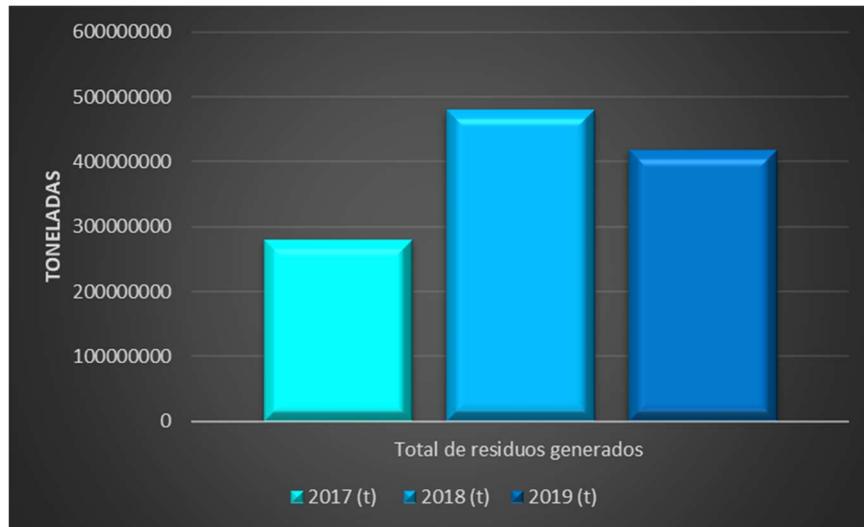
### 5.1 ESTADO ACTUAL DE GENERACIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS TIPO Y9 + A4060

El estado actual de los residuos especiales se presenta para tres panoramas: el global, donde se incluyen valores de generación a nivel mundial de dichos residuos y por ende la aplicabilidad de proyectos de aprovechamiento a ese mismo nivel, el panorama nacional que brinda una visión sobre el tipo de proyectos que se requieren en términos del tipo de residuos de mayor generación en el país y finalmente el panorama específico de los residuos de estudio donde considerando su producción, se pueda visibilizar la necesidad de generar proyectos que permitan a través de su transformación, convertirse en materia prima de otros proyectos.

#### 5.1.1 Antecedentes de generación de residuos peligrosos – panorama global

El panorama global reúne datos importantes sobre producción y gestión de residuos peligrosos en todo el mundo, de acuerdo al Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos IFISC (CSIC-UIB) de Palma de Mallorca en su artículo “World-Wide Waste Web”, se estima que cada año se produce un aproximado de entre 7.000 y 10.000 millones de toneladas de residuos, de los cuales entre 300 y 500 millones son catalogados como peligrosos.

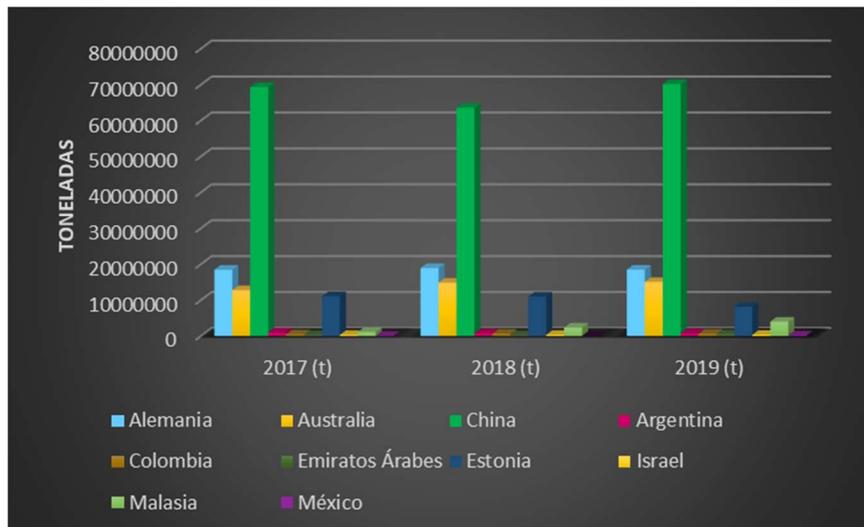
Como cifras generales reportadas de acuerdo al Convenio de Basilea (2021) se evidencia en la **Figura 7** que la tendencia en generación de dichos residuos a nivel global es creciente, considerando que del 2017 al 2019 existió un crecimiento de aproximadamente un 40% de los mismos, es importante mencionar que no se consideró el 2020 debido a las anomalías presentadas por el impacto por COVID 19 a las industrias, por lo cual generaría un dato atípico al comportamiento habitual.



**Figura 7 Total de residuos generados a nivel mundial**

**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

Como revisión general, en la **Figura 8** , se puede observar información de los países que han reportado a través del convenio la generación y manejo de sus residuos entre el año 2017 al 2019. A nivel Latinoamérica se puede observar que México, en el 2019 reportó una generación de 3.5% menor a la de Colombia, aun cuando su producción de petróleo de acuerdo a IDEAM (2021) es más de 50% que la del país.



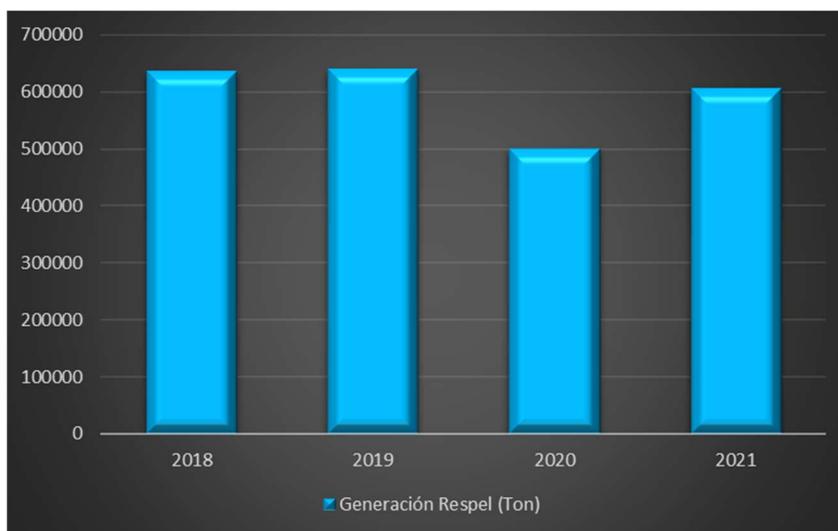
**Figura 8 Volumen de residuos peligrosos generados reportado por país**

**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

### 5.1.2 Antecedentes de residuos peligrosos – panorama nacional

El panorama a nivel nacional frente a la generación, gestión y aprovechamiento de residuos sólidos peligrosos, se basa principalmente en los informes de residuos y desechos peligrosos generados a través del Registro de Generadores de Residuos Peligrosos (RESPEL). Para el análisis temporal del presente estudio se tuvo en cuenta el rango de años 2018-2021, teniendo como referencia el último informe generado por el IDEAM en el momento de elaboración del presente documento.

De acuerdo con la **Figura 9**, Colombia desde el año 2018 ha presentado un aumento exponencial de generación de residuos peligrosos, considerando el año 2020 como uno atípico debido a la contingencia presentada por la pandemia del Covid 19. Los valores más altos lo registran los años 2018-2019, el valor para el año 2021 vuelve a entrar en rangos similares a los que traía la tendencia de generación antes del 2020. Por lo anterior se puede evidenciar que, en Colombia, la optimización de materias primas y disminución en la generación de residuos aún no genera cifras significativas en el país en este tipo de residuos.

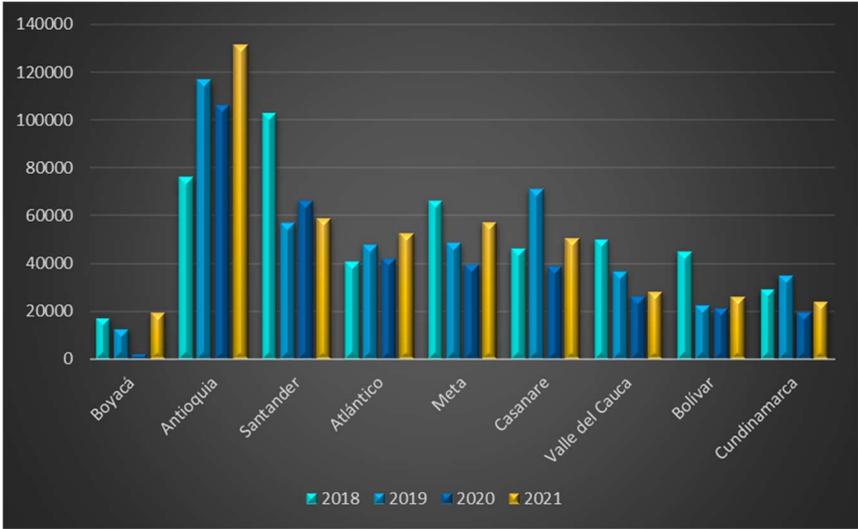


**Figura 9** *Histórico de generación de residuos peligrosos en Colombia*

**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

Continuando con el análisis a nivel nacional, en la **Figura 10** se puede evidenciar que en los últimos años los departamentos con un volumen mayor de generación de residuos peligrosos son los de Antioquia que presenta una tendencia crecimiento, Santander aun cuando su tendencia es decreciente; es importante también resaltar el panorama en el

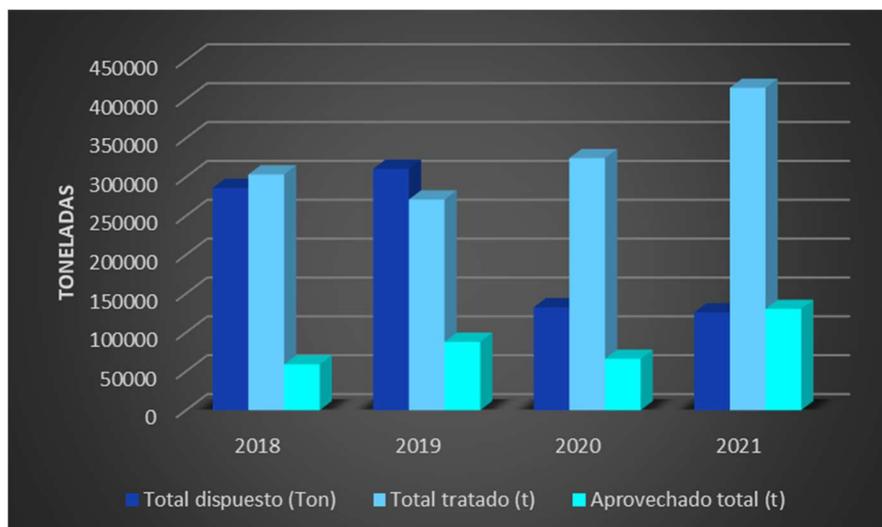
departamento del Meta debido a que así como en el departamento de Santander, se registra una alta actividad de la industria de hidrocarburos en el país, en ese escenario la tendencia es decreciente hasta el año 2020 y presentó un aumento en el 2021.



**Figura 10 Generación de residuos peligrosos por departamento en Colombia.**

**Fuente: Adaptado de (IDEAM, 2022)**

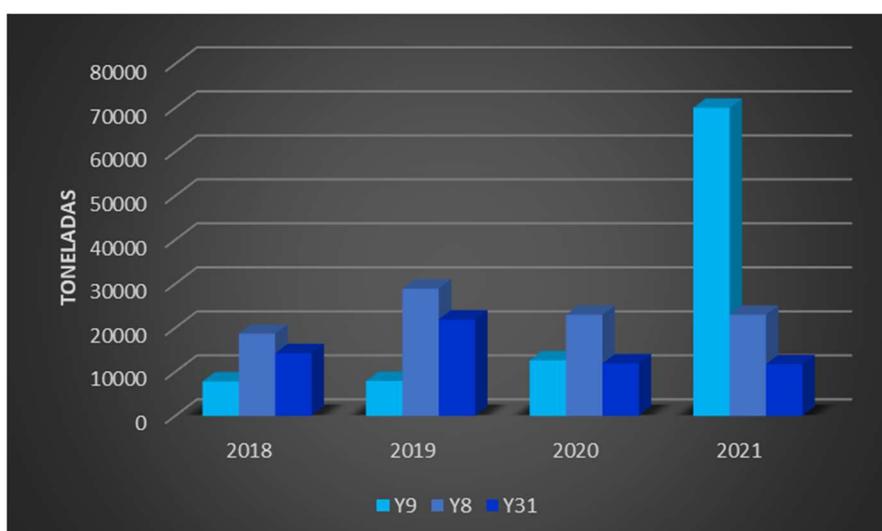
Respecto al manejo realizado a los residuos peligrosos, de acuerdo al informe nacional de RESPEL se reportan las siguientes operaciones: almacenamiento, aprovechamiento o valorización (recuperación, reciclaje o regeneración), tratamiento y disposición final. En la **Figura 11** se observa un aumento en el tratamiento de los RESPEL en el país, así mismo un incremento sustancialmente mayor en el aprovechamiento comparado con la disposición final de un aproximado del 20% del total generado.



**Figura 11 Manejo de residuos peligrosos en Colombia.**

**Fuente: Adaptado de (IDEAM, 2022)**

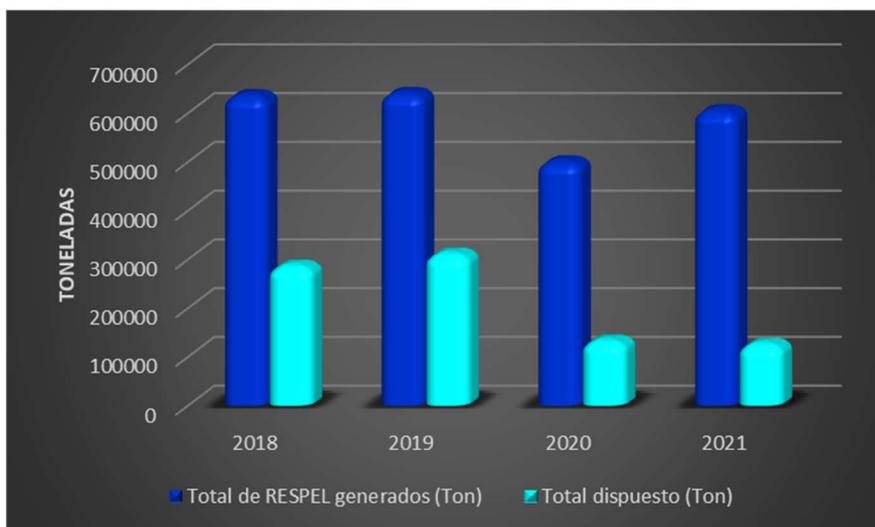
De acuerdo a la **Figura 12**, en Colombia el manejo de residuos a través de tratamiento ha presentado una tendencia creciente como se mencionó anteriormente, dentro de las categoría de RESPEL con mayor aprovechamiento se encuentran los relacionados con residuos de hidrocarburos (Y9), de aceites minerales (Y8) y finalmente aquellos que contienen plomo (Y31).



**Figura 12 Aprovechamiento de residuos peligrosos en Colombia.**

**Fuente: Adaptado de (IDEAM, 2022)**

Finalmente, de acuerdo a la **Figura 13** se puede determinar que: en el año 2019, los generadores de RESPEL reportaron la disposición final de 310.615 toneladas, lo que indica 24.695 ton más que en el año 2018, de las cuales 5.661 ton fueron dispuestas en los establecimientos del generador (2%), y 304.953 toneladas fueron llevadas a disposición final por terceros (gestores autorizados) (98%). Mientras que para el año 2021 el porcentaje de residuos llevados a disposición final presento una disminución, lo que indica que la opción de aprovechamiento está siendo más atractiva para los generadores de residuos peligrosos, bien sea por sus costos o beneficios ambientales.



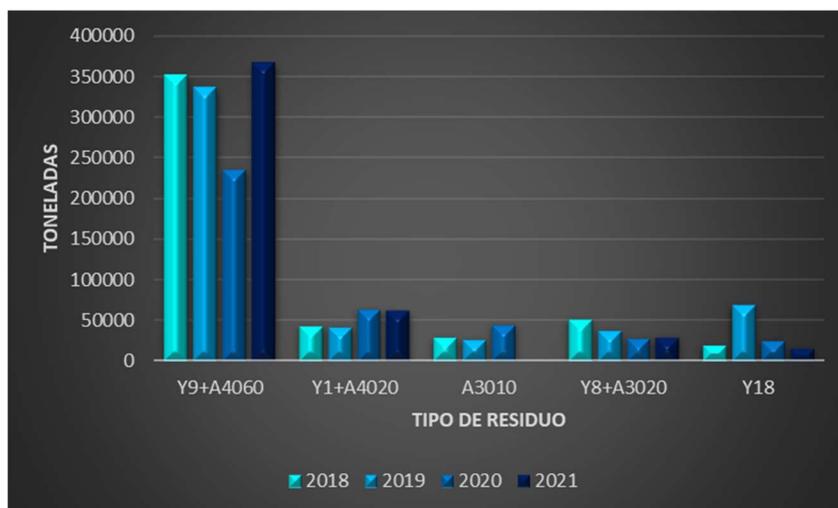
**Figura 13 Disposición final de residuos peligrosos en Colombia.**

**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

### 5.1.3 Gestión de residuos Y9 + A4060 en Colombia

De acuerdo con el panorama nacional, los residuos clasificados como peligrosos de mayor producción en el país son los denominados Y9- Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua; y A4060 -Desechos de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua. Para poder lograr lo anterior, se realizó el análisis de tendencia de dichos residuos con los informes de los años 2018, 2019, 2020 y 2021, se analizaron los datos registrados tanto de generación, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los mismos, para poder delimitar el manejo que se les da a dichos residuos en el país y las zonas del país con mayor generación para conocer donde se centralizan.

A nivel general, del total de los residuos peligrosos generados en el país, durante los cuatro años del análisis, los residuos Y9+A4060 registran como los de mayor generación por diferencias considerables del que le sigue que son los Y1+A4020 que están relacionados con desechos clínicos. Dicho escenario se puede observar en la **Figura 14**.

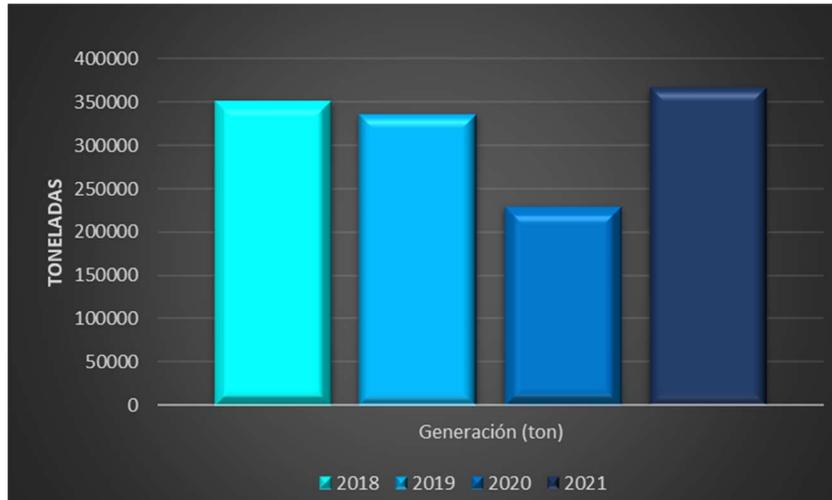


**Figura 14 Tipos de residuos peligrosos generados en Colombia**

**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

### 5.1.3.1 Generación

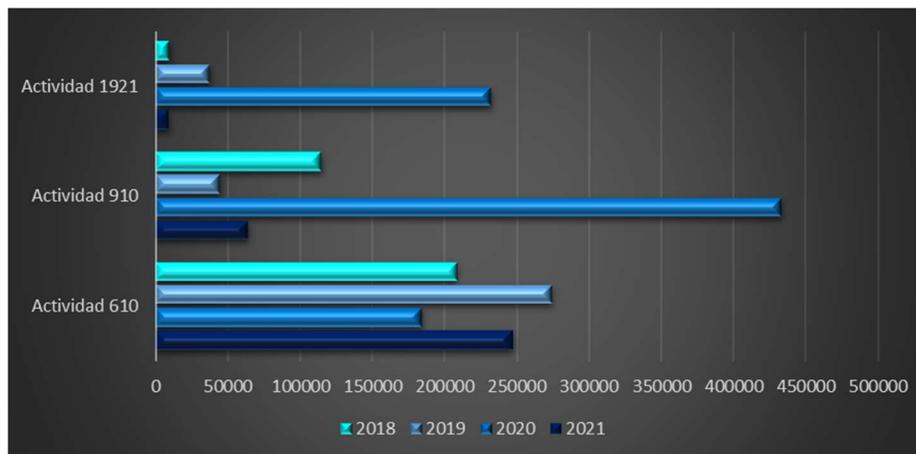
La generación de dichos residuos, de acuerdo al análisis multitemporal realizado, ha presentado en el país una disminución entre el 2018 al 2019 del 4% y del 2019 al 2020 del 31%, sin embargo, entre los años 2020 y 2021 se presentó un aumento de 37% de generación (**Figura 15**). La diferencia entre los dos últimos años de análisis, se puede atribuir a la contingencia por la pandemia presentada en el 2020 que afectó la producción de hidrocarburos, es decir que disminuyó la generación de residuos porque la producción de hidrocarburo disminuyó y una vez se dio fin a la contingencia se normalizó la actividad.



**Figura 15 Generación residuos Y9+A4060**

**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

De acuerdo a la **Figura 16** para el periodo 2018-2019 la actividad de extracción de petróleo crudo (0610) presentó un aumento del 23%, para las actividades de apoyo para extracción de petróleo y gas natural (910) existió una disminución del 60% y para la Fabricación de productos de refinación de petróleo (1921) del mismo modo que la actividad 0610 aumentó el 73%.



**Figura 16 Generación por actividad económica que produce residuos Y9+A4060**

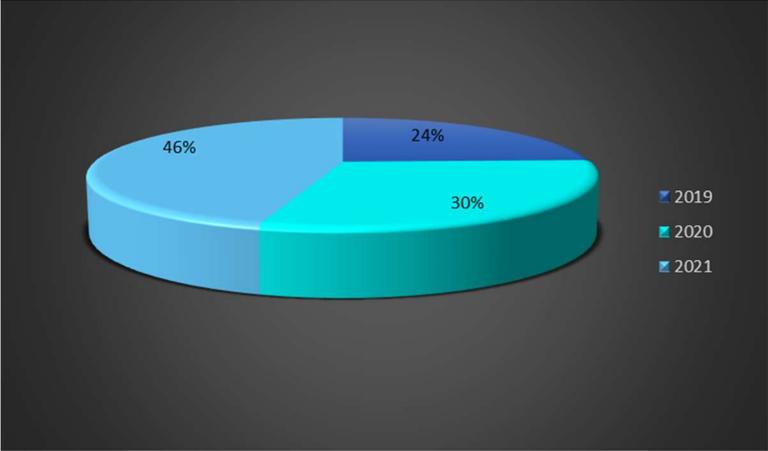
**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

Lo anterior es de suma relevancia por varios motivos, el primero es porque se conoce la tendencia de generación de los residuos en el país que si bien es decreciente, sigue permaneciendo como la de mayor volumen generado por lo que su gestión es relevante,

adicionalmente permite evidenciar que los residuos tienen una relación directamente proporcional a la producción de la actividad, y en este caso dicho sector económico es uno de los más importantes a nivel nacional.

**5.1.3.2 Tratamiento**

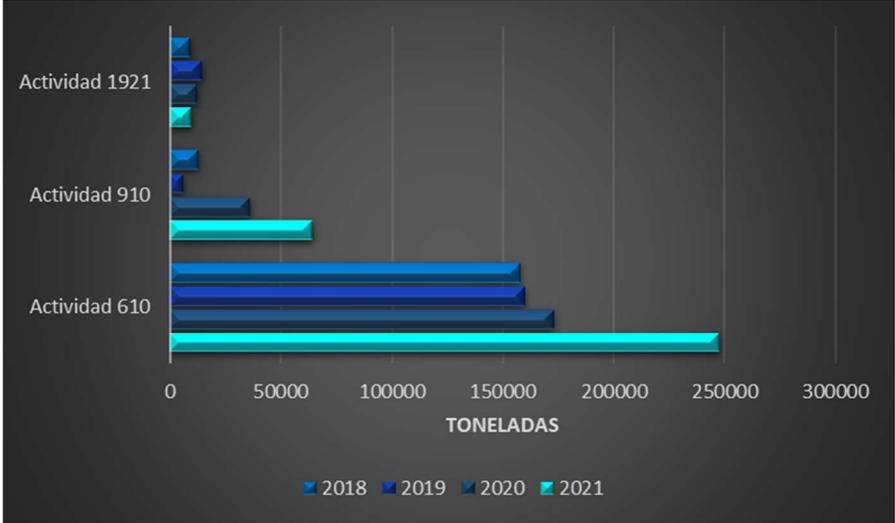
Los reportes hasta el 2018 presentaron los resultados por actividad económica y no por tipo de residuo, sin embargo, se puede evidenciar de acuerdo a la **Figura 17** , desde el año 2019 y hasta el 2021 se ha generado un aumento en el tratamiento de residuos producidos pasando de un 24% a un 46%, sin embargo, es importante recordar que dicho tratamiento no siempre responde a posibilidades de aprovechamiento.



**Figura 17 Porcentaje de volúmenes de residuos tratados Y9+A4060**  
**Fuente: Adaptado de (IDEAM, 2022)**

En términos de actividades económicas, de acuerdo con la **Figura 18**, la Extracción de petróleo crudo (0610) cuenta con el mayor volumen de residuos tratados, así como el mayor volumen producido, su tendencia no ha sido estable pues en el 2018 se trató el 76% de sus residuos, sin embargo, en el 2019 fue de solo 58% y de nuevo tuvo un aumentó en el 2020 del 94% tratados. Del mismo modo para las actividades de apoyo para la extracción de petróleo y gas natural (910) se presentó un aumento significativo de residuos para el año 2020, pues pasaron del 12% en 2018 al 84% en dicho año.

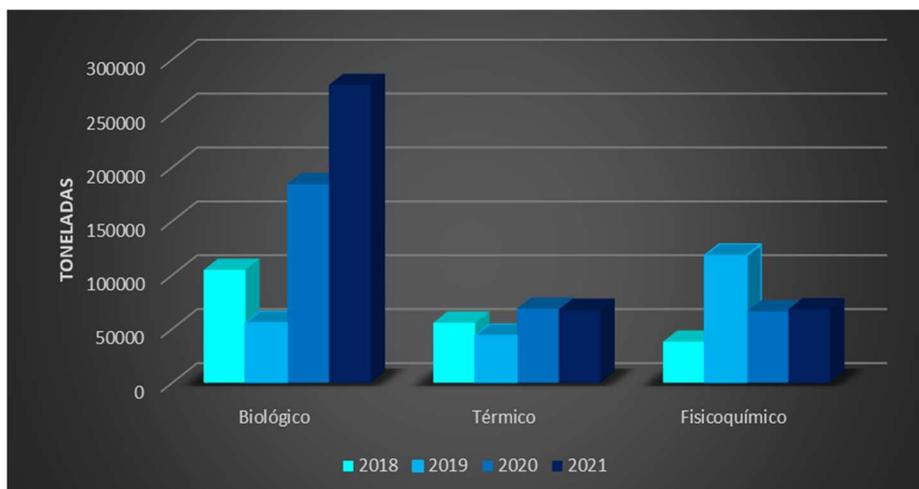
Caso contrario ocurre con la actividad de Fabricación de productos de refinación de petróleo (1921) donde para el año 2018 se trataron el 94% de sus residuos, pero para el 2020 tan solo el 55%, una disminución porcentual del 40% aproximadamente.



**Figura 18 Volumen de residuos tratados por actividad económica**

**Fuente: Adaptado de** (IDEAM, 2022)

De acuerdo a la **Figura 19**, para el año 2018 el tratamiento que predomina es el biológico que está estrechamente relacionado con la biorremediación, para el año 2019 en cambio, los tratamientos predominantes son los fisicoquímicos. Sin embargo, la tendencia en los tratamientos biológicos volvió a aumentar, ya que para los dos años siguientes (2020 y 2021) predominó nuevamente. Es importante resaltar que los tratamientos térmicos no tuvieron una representatividad significativa en la gestión de los residuos Y9+A4060.

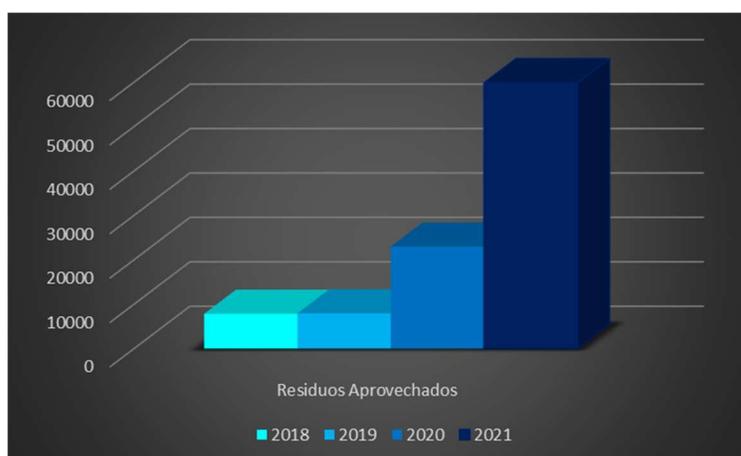


**Figura 19 Tipo de tratamiento utilizado para los residuos**

**Fuente: Adaptado de** (IDEAM, 2022)

### 5.1.3.3 Aprovechamiento

El aprovechamiento de los residuos aceitosos en el país ha visto incrementó en los últimos años, para el 2018 y 2019 se mantuvo estable, mientras que para los años 2020 y 2021 presentó un aumento del casi 40%. Si bien dichos residuos en los cuatro años evaluados han reportado uno de los mayores volúmenes de residuos, también han sido para su tratamiento previo aprovechamiento entregado a terceros lo cual da a entender que si bien son aprovechados lo anterior no se da por la industria que los genera.



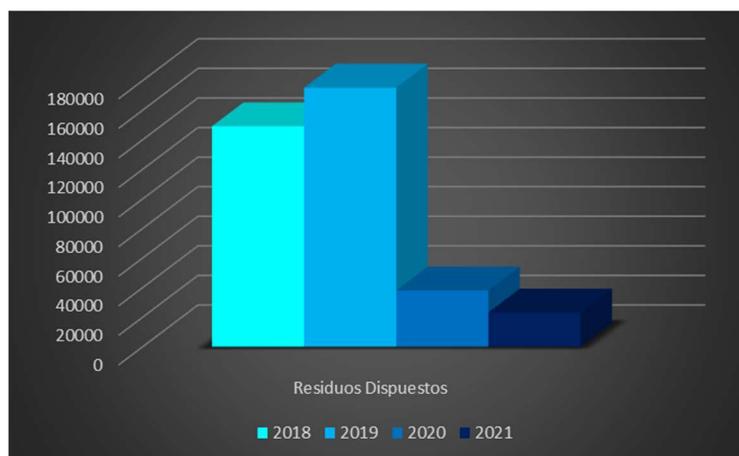
**Figura 20 Aprovechamiento de residuos Y9+A4060**

**Fuente: Adaptado de** (IDEAM, 2022)

Considerando que se presentan diferentes tipos de aprovechamiento y que dado el origen del residuo este clasifica o no para tal fin, se determinó que para los residuos Y9+A4060 la forma de aprovechamiento más usado fue por medio de gestores con hornos incineradores para aumentar el potencial de ignición, lo cual dentro de las operaciones de aprovechamiento está clasificado con R1: utilización como combustible, diferente a la incineración directa, u otros medios de generar energía.

#### 5.1.3.4 Disposición final

De acuerdo a la **Figura 21**, en el periodo 2018-2019 se presentó un incremento en los residuos aceitosos que provienen de la industria de hidrocarburos, aun cuando tienen los mayores porcentajes de tratamiento. Lo que puede demostrar que se requieren nuevas estrategias de reúso o reincorporación a cadenas productivas para que pueda disminuir dichas cifras. Sin embargo, para el 2020 y 2021 disminuyó el volumen de residuos enviados a disposición final, cabe resaltar que al ser un año atípico en la industria el volumen generado también disminuyó, pero no se puede tomar como la tendencia definitiva.

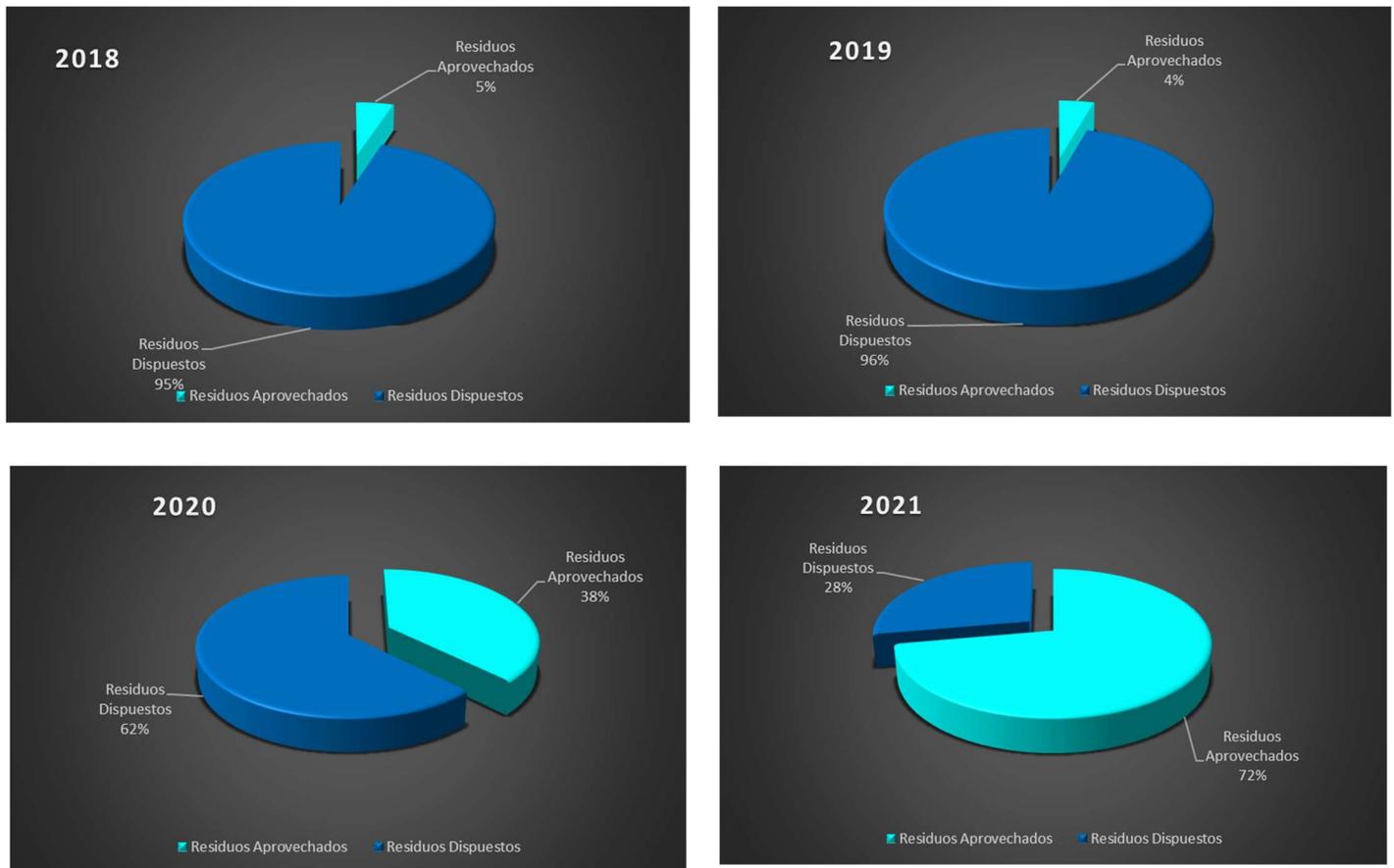


**Figura 21 Residuos enviados a disposición final Y9+A4060**

**Fuente: Adaptado de (IDEAM, 2022)**

Como visión final y general del manejo de residuos aceitosos Y9+A4060 se toma el volumen que fue aprovechado contra el volumen que fue dispuesto, en la **Figura 22** se puede observar dicha comparación concluyendo que para el año 2018 fue menos del 5% de residuos aprovechados, para el 2019 disminuyó la cantidad aprovechada a tan solo el 4%, sin embargo dicho comportamiento es desigual para los siguientes años ya que en el 2020

aun siendo un año atípico fue mucho mayor la cantidad aprovechada (38%) que la cantidad enviada a disposición final, similar a lo que ocurre en el año 2021 con un aprovechamiento del 72% contra una disposición final del 28%.



**Figura 22 Balance de disposición y aprovechamiento residuos Y9+A4060**

**Fuente:** Adaptado de (IDEAM, 2022)

De acuerdo a todo lo anterior se pueden evidenciar puntos importantes a tener en cuenta en el estado actual de los residuos de estudio en el país:

- La generación de los residuos Y9+A4060 sigue con una tendencia en aumento, lo cual es evidencia de la necesidad que se tiene de realizar una mayor gestión de los mismos, encaminada más en la reducción y aprovechamiento que en el tratamiento para disposición final.
- El tratamiento de los residuos es una práctica que ha venido en aumento con los años, principalmente lo relacionado con métodos biológicos. Considerando que

dichos tratamientos buscan la reducción o eliminación de las características peligrosas del residuo se ha podido incrementar el aprovechamiento de los mismos evidenciando una tendencia en aumento de dicha práctica en más del 50% entre los años evaluados.

- Finalmente, existe un potencial de aprovechamiento que no se ha explorado en el país con la integración de residuos a otros procesos productivos considerando un enfoque orientado a la valorización y aprovechamiento que potenciaría no solo al país considerando que son los residuos de mayor generación, sino que también podrían generarse procesos investigativos de tecnologías rentables y de co-procesamiento y circularidad en las diferentes actividades económicas del mismo.

## **5.2 CASOS DE ESTUDIO SOBRE USO DE RESIDUOS Y9+A4060 Y POTENCIALES INDUSTRIAS**

A lo largo de los años se han desarrollado diferentes proyectos y/o investigaciones sobre el aprovechamiento de este tipo de residuos y servirán como guía para proyectar la viabilidad del uso de los mismos en otro tipo de sectores económicos, para así dar circularidad a los diferentes procesos.

A continuación, se listan tres posibles usos de los residuos Y9+A4060 de acuerdo a diferentes artículos científicos y su proyección de aplicación a nuevas industrias, un análisis de viabilidad y el enfoque de economía circular que puede presentar, dependiendo de su origen y desarrollo procesal.

### **5.2.1 Uso como agregado para construcción y mantenimiento de vías terciarias**

El primer caso de estudio está relacionado con las diferentes investigaciones realizadas para el uso de los residuos Y9+A4060 en conjunto con un material granular para la construcción y/o mantenimiento de vías terciarias con el fin de optimizar los procesos industriales. Como se mencionó en el numeral **2.1.3 Riesgo de los residuos, tratamientos asociados y disposición final**, las llamadas borras tienen un carácter contaminante y adicional son poco útiles para la industria por lo cual se convierten en una problemática ambiental y económica aún mayor.

Dicho lo anterior, el alcance del proyecto se basó en “evaluar la posibilidad de utilizar agregados pétreos y residuos petroleros conocidos como borras para utilizarse en conjunto para el mejoramiento de las vías terciarias construidas o por construir” (VALBUENA ROJAS & SIERRA GONZÁLEZ, 2015).

➤ *Descripción del proceso*

De acuerdo con Ochoa Arango (2009), luego de llevarse los residuos que se encuentran en los tanques de almacenamiento al punto de tratamiento, se depositan en recipientes para realizar la decantación de las dos fases en las que se encuentra el mismo (líquida-sólida).

Luego, dicho resultante sólido o emulsificado se mezcla, en iguales cantidades de acuerdo al autor anterior con desechos de construcción como ladrillo, desecho de cemento, etc. Mientras esta mezcla se realiza, se añade cemento portland y emulsión asfáltica para lograr una base de carreteras de buena calidad.

➤ *Viabilidad y beneficios del proyecto*

Para considerar la viabilidad del uso de dichos residuos como material asfáltico mezclándolo con material granular, el autor tuvo en cuenta el determinar las nuevas características mecánicas que produce esta mezcla y su posible uso.

Teniendo en cuenta que de acuerdo con Arenas (2019) “solo el 45% del crudo es pesado en Colombia”, el proyecto en estudio realizó las pruebas con muestras de pozos de tipo liviano, es interesante resaltar que también se consideró la humedad del agregado que en este caso fue recebo para poder tener el resultado óptimo.

La mezcla de acuerdo al autor, presentó una propiedad impermeable que trae beneficios al mismo ya que no permite que el material se sobresature, así mismo se evidenció que tenía la capacidad de atrapar los finos que contiene el recebo y por ende se estaría evitando que los mismos generaran impacto en la atmosfera y salud humana con su re-suspensión en el afirmado.

Otro beneficio positivo del uso de borras en la mezcla para la capa asfáltica es la capacidad portante obtenida de acuerdo a las pruebas de resistencia CBR realizadas, ya que se concluye que “las borras permiten mejorar la capacidad del suelo para soportar los esfuerzos cortantes a los que se encuentra sometida la muestra,” (VALBUENA ROJAS & SIERRA GONZÁLEZ, 2015).

El aspecto más relevante a tener en cuenta para el uso de dichos residuos en actividades de pavimentación de vías es la eliminación de los hidrocarburos volátiles que componen las borras, debido a que podría ocasionar un problema por su inflamabilidad. Sin embargo, lo que pudo determinarse en ese tema es que debe realizarse un lecho de secado en condiciones controladas que permita que la mezcla este homogénea y eliminar de forma natural dichos componentes.

➤ *Aplicabilidad de la economía circular e industrias potencialmente beneficiarias*

La economía circular como se explicó en el **numeral 2.2** propende por proyectos que permitan maximizar el uso de materiales y minimizar la cantidad de residuos generados. En ese sentido, se puede evidenciar que el proyecto presentado anteriormente donde se plantea el uso de un residuo como materia prima de otro proceso y que generaría beneficios en muchos sentidos al medio ambiente, presenta elementos de economía circular en su aplicación.

Las vías de Colombia en su mayoría son clasificadas como terciarias, de acuerdo al ministerio del transporte e INVIAS para el año 2021 eran casi el 69.2% del total de las vías del país con una longitud cercana a los 143.000 km y de los cuales solo 1400 km están pavimentados. Por lo cual, tener elementos como las borras para mezclar con otros elementos y así conseguir material para mejorar el estado de las vías, hace que se pueda no solo recircular los materiales de un sector económico a otro, sino traer beneficios a las comunidades que han sufrido por la re-suspensión de finos.

Las industrias que tendrían un potencial interés en aplicar este tipo de técnicas están centradas en el sector vial y de la construcción, considerando que es uno de los más activos en Colombia y que actualmente de acuerdo al Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF) “existen déficits muy marcados en la identificación, priorización y diseño de los proyectos carreteros”.

### **5.2.2 Uso de los residuos para el proceso de producción de combustóleos.**

El segundo caso está relacionado con el uso de los residuos Y9+A4060 para la producción de otro tipo de combustible conocido como Fuel Oil No. 6 que de acuerdo a Ecopetrol (2018) es “un combustible elaborado a partir de productos residuales que se obtienen de los procesos de refinación del petróleo”.

Este producto es uno de los principales combustibles utilizados en industrias como la de generación de vapor y de electricidad, pues la misma requieren de un uso intensivo de energía. “Está diseñado para usarse especialmente como combustible en hornos, secadores y calderas. También puede utilizarse para calentadores (unidades de calefacción) y en plantas de generación de energía eléctrica” (Ochoa Arango, 2009).

➤ *Descripción del proceso*

Para la obtención del combustóleo se debe primero retirar los sólidos de las borras, luego pasa por un proceso de centrifugado, “ya que como las borras presentan tres fases, siendo una de ellas el agua, se deben separar las otras dos fases (combustible y lodo) para iniciar la separación de lo que se utilizaría como materia prima para el combustóleo”(Ochoa Arango, 2009).

Luego de centrifugar la mezcla de lodo con combustible, debe pasar a través de un filtro prensa para retirar el lodo y las arcillas, y finalmente obtener la composición deseada que en este caso es únicamente el combustible. Finalmente, para obtener el producto deseado se deben agregar aditivos, ACPM para mejorar el nivel de combustión y pasar a la etapa operativa o de uso.

➤ *Viabilidad y beneficios*

La producción de combustóleo es una práctica que viene realizando la industria de hidrocarburos hace varios años, en ella han podido generar combustible para otros de sus procesos productivos y de esa manera evitar la disposición final de todo el producto restante. Sin embargo, dicho residuo como producto o materia primera se vuelve de nuevo un combustible fósil que adicionalmente trae ciertos grados de impureza cuyas características generales exigen métodos especializados para su empleo.

Debido justamente a su composición, al hacer uso del mismo se están generando una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera, un ejemplo de ello es su contenido de azufre, que es de aproximadamente 1.8 g/ 100 g y cuando es sometido a procesos de combustión dicho componente se transforma en dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) que es considerado un gas contaminante.

Si bien el aprovechamiento de estos residuos como parte del proceso de producción de combustóleos es una práctica que trae beneficios para la industria y genera un proceso de

aprovechamiento, sus desventajas hacia otras matrices como el medio ambiente o la salud humana hace que su implementación dentro de proyectos ambientalmente sostenibles no se considere viable.

➤ *Aplicabilidad de la economía circular*

La aplicabilidad a la economía circular de este proceso se debe revisar desde dos aristas, la primera relacionada con procesos de aprovechamiento de materiales y retorno al ciclo productivo, que para este caso son aplicables pues se está recuperando de un residuo materiales que pueden regresar al ciclo productivo y ser usados en otros procesos de la industria, por lo cual se puede pensar que generan una circularidad.

Sin embargo, existe otra arista que se debe considerar y es el tipo de sostenibilidad en la que se basa la economía circular y es sistemas socio-ecológicos, por lo anterior, aunque el producto presentando pueda generar un reúso favorable para la industria, no lo presenta para el aspecto biótico del sistema que en este caso se relaciona con los impactos negativos a la salud y atmosfera por emisiones; y es por esto que el uso de este tipo no se considera viable para la presente investigación.

### **5.2.3 Uso como combustible para los hornos cementeros.**

El último caso de estudio se relaciona con el aprovechamiento energético de los residuos de estudio, el objetivo principal, es considerar la viabilidad del uso de los residuos A4060 relacionados con emulsiones, como combustible alternativo en hornos cementeros, para así lograr reducir el uso de otros tipos de fuentes de calor y energía como "el carbón que produce en su incineración una gran cantidad de emisiones atmosféricas" (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2022).

➤ *Descripción del proceso*

Como parte principal del proceso existe una actividad conocida como co-procesamiento, que de acuerdo a Molina (2021) se define como "la incineración llevada a cabo en hornos rotatorios para la producción del Clinker sin producción posterior de otro tipo de residuo". De acuerdo a lo anterior, lo principal en este proceso es entender el potencial que tiene la industria cementera para reutilizar el componente aceitoso de las borras producidas en los procesos de la industria petrolera, utilizándolos como un combustible alternativo.

Los residuos Y9+A4060 deben ser previamente acondicionados para que puedan incorporarse a este proceso industrial, dentro del cual se busca la eliminación de compuestos volátiles y metales pesados, así mismo “se debe disminuir los contenidos de cloro y azufre en porcentajes menores a 0.2% y 2.5% respectivamente y garantizar una capacidad calorífica en el residuo superior a 14 mj/kg” (Molina, 2011), de este modo se puede garantizar la estabilidad del residuo y darse el aprovechamiento energético del mismo.

Finalmente, cuando el residuo se encuentra en condiciones óptimas será adicionado al proceso y con esto contribuir también al reemplazo de combustibles tradicionales utilizados en esta industria como lo es el carbón.

➤ Viabilidad y beneficios del proyecto

Lo primero que se debe tener en cuenta es que *“la industria cementera en Colombia, consume en su gran mayoría combustibles fósiles convencionales como materia prima para sus hornos, restringiéndose estos a carbón, gas y diesel”* (Molina, 2011). Sin embargo, se han venido vinculando a otros tipos de combustibles que pueden ser menos contaminantes y con un potencial energético incluso superior al obtenido inicialmente por los combustibles convencionales.

En otro aspecto, evaluar que de acuerdo al **numeral 5.1.3.2 Tratamiento** relacionado con el panorama nacional referente al tratamiento de los residuos de interés en el país, se puede observar en la **Figura 17** que el volumen de residuos Y9+A4060 ha venido en tendencia creciente, lo que abre un espacio a posibles convenios intersectoriales que traigan beneficios de diferente tipo pero principalmente ambientales a la industria.

Si se evalúa en este caso, la viabilidad del uso de residuos de producción petrolera, en la sustitución parcial de combustibles fósiles empleados en los hornos de la industria cementera, se puede evidenciar que existe un gran potencial para el aprovechamiento de residuos aceitosos de la industria petrolera no solo en la industria del cemento, sino en general en industrias con procesos intensivos de calor debido a su potencial calorífico.

Del mismo modo y teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, existirían ventajas principalmente en la disposición de los residuos, es decir, ya que en el proceso el residuo aceitoso es incorporado en su totalidad al producto de la industria del cemento, se estaría evitando su disposición o la generación de un nuevo residuo a partir de su aprovechamiento

y con esto se disminuiría el volumen que se destinaría a disposición en celda de seguridad, sin embargo, se debe evaluar de manera relevante lo relacionado con el transporte desde el lugar de tratamiento a los hornos cementeros teniendo en cuenta que pueden estar generándose en diferentes departamentos del país y por ende existiría una desventaja económica.

➤ *Aplicabilidad de la economía circular*

En consideración con los principios de la economía circular, principalmente segundo y tercero que buscan la optimización de los recursos y la circularidad de los mismos para generar un mayor nivel de utilidad, el co-procesamiento de residuos sería considerada una práctica que se relaciona directamente con el nuevo modelo de economía.

Del mismo modo, y teniendo en cuenta que únicamente en abril de 2023, de acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE la producción de cemento gris a nivel nacional fue de 1.111,8 miles de toneladas, existe una oportunidad indiscutible de reincorporación de residuos en este caso aceitosos, a un ciclo productivo de una industria que actualmente se encuentra activa y en busca de nuevas oportunidades de aprovechamiento para reducir su huella de carbono sin disminuir su producción.

Las industrias que tendrían un potencial interés en aplicar este tipo de técnicas están relacionadas con las que requieran un alto potencial energético como la del cemento y existe una posibilidad en industrias como metalurgia y de la siderurgia por sus requerimientos energéticos, sin embargo, se deben evaluar otros aspectos técnicos para su incorporación debido al origen del residuo y los productos que se obtienen en las mismas.

### **5.3 PROPUESTA DE ELEMENTOS CON ENFOQUE DE ECONOMIA CIRCULAR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS Y9+A4060**

Luego de realizar una investigación exhaustiva sobre características y estadísticas relevantes del aprovechamiento de los residuos peligrosos de estudio y considerando los aspectos más importantes de la economía circular para este tipo de proyectos, se debe realizar una conjunción que logre generar resultados satisfactorios desde un punto de vista técnico, ambiental y socioeconómico.

La propuesta que se presenta a continuación está relacionada con la selección de elementos relevantes que se deben considerar en el momento de generar proyectos enfocados en el aprovechamiento de dichos residuos no desde un enfoque lineal sino desde un enfoque de procesos circulares que puedan convertirse en herramientas fundamentales para dichos proyectos, de acuerdo a los diferentes resultados obtenidos tanto de generación como de posibles usos a través de los casos de estudio.

Se seleccionaron dos grandes grupos de elementos, que por su aplicabilidad generan un panorama global del proceso de aprovechamiento ya que son de uso universal y pueden adaptarse a características individuales de cada proyecto. Luego de esto, se buscó generar una aplicación general de cada uno de ellos, puntualizando en su aplicación para finalmente definir su aplicabilidad en los proyectos relacionados, y con esto explicar la utilidad de cada uno de ellos frente al aprovechamiento de residuos con un enfoque circular.

El objetivo final del desarrollo de estos elementos, es que puedan ser de utilidad para la evaluación y toma de decisiones de diferentes industrias en la aplicación de los proyectos generados, buscando que se pueda tener un conocimiento de los residuos ahora como materias primas y entendiendo su importancia en la gestión de residuos ya que la misma debe priorizar en su ciclo la recirculación de elementos a nuevas cadenas productivas.

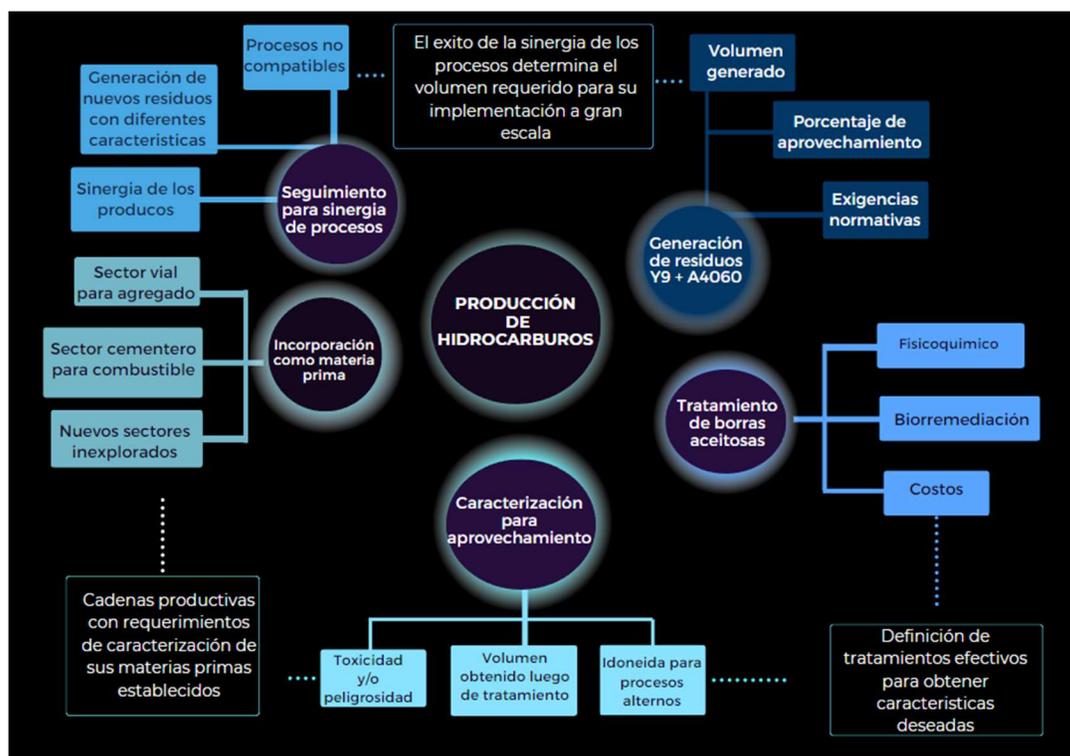
### **5.3.1 Grupo de elementos de enfoque en el ciclo**

El grupo de elementos orientados al enfoque de ciclo, hace referencia a identificar elementos que divergen de los implementados de manera tradicional y por ende difieren de técnicas que se encuentren ligados a sistemas lineales de producción. Estos elementos permitirán conocer características relevantes a tener en cuenta en el momento de plantear proyectos de aprovechamiento orientados con el origen de producción del residuo (la finalización del proceso productivo de hidrocarburos) hasta su reincorporación a otra cadena de valor.

Como primera medida se deben considerar los elementos que lo componen, denominados como entradas y salidas, en este caso las entradas relacionadas con el sector de hidrocarburos y las salidas ligadas a los diferentes actores que se identificaron pueden incorporar el residuo tratado a su ciclo productivo, esto es muy importante porque da las pautas para conocer las características adecuadas para que pueda llevarse a cabo esa

integración. Y finalmente que parámetros o aspectos cuantificables (definidos también como indicadores, sistemas de medición o datos cuantificables) se deben tener en cuenta.

De acuerdo con lo anterior, a continuación se presenta un esquema general del ciclo para el aprovechamiento de los residuos Y9+A4060 (**Figura 23**), el cual genera puntos clave de importancia para el desarrollo de proyectos que busquen el aprovechamiento, ya que genera no solo puntos de inflexibilidad del mismo, sino que también se pueden ver interacciones de importancia que permitirían el éxito de su ejecución.



**Figura 23 Enfoque de ciclo**

**Fuente: Elaboración propia, 2023**

Con la figura anterior, se identifican puntos cuantitativos relacionados con la generación, tratamiento y caracterización para el aprovechamiento que permiten desarrollar un panorama global de su reincorporación, pues definen volúmenes de generación, tratamientos asociados y definición de entrega del residuo tratado, ya que brinda las características finales de la nueva materia prima para uso.

Así mismo, existen puntos cualitativos en la **Figura 23**, asociados en primera estancia a la identificación de los sectores que pueden generar proyectos de aprovechamiento de los residuos, porque por sus necesidades puedan incorporarlas y finalmente, el seguimiento

como parte fundamental de este proceso, ya que pueden generarse factores de incompatibilidad que deban considerarse como nuevos puntos del ciclo, generación de residuos inesperados que exijan desarrollar nuevos procesos alternos y el éxito que permitan profundizar en opciones de mejora.

Del mismo modo, para el diagrama anterior, se deben tener en cuenta de manera más detallada las siguientes características claves del residuo, que permitirán un desarrollo óptimo del diagrama de enfoque basado en el ciclo:

- **Peligrosidad o toxicidad:** Es la principal característica a tener en cuenta para este tipo de residuos ya que puede ser uno de los principales impedimentos para la incorporación a otro proceso productivo, la misma está relacionada con los peligros intrínsecos que trae por su composición final debido a que viene impregnado con hidrocarburos, agua y sólidos.

Si bien es cierto que existen diferentes procesos que logran eliminar la mayoría de compuestos químicos que aportan el carácter peligroso con procesos como la biorremediación, es importante revisar si para el proceso al que se quiera reincorporar se requieren algunos de ellos y que el producto final que se obtenga (sea residuo o materia prima útil) no posea un grado de peligrosidad mayor.

- **Composición:** De acuerdo a la composición del residuo se define su aprovechamiento, ya que de acuerdo al numeral **2.1.2 Composición de los residuos Y9+A4060**, los mismos pueden tener diferentes densidades que define también la facilidad de degradación del hidrocarburo que compone el residuo.

- **Tratamientos:** Conocer los diferentes tratamientos desarrollados para este tipo de residuos, abre el espectro de uso del residuo de interés, es importante entender no solo el tratamiento que sufren previo a su clasificación como residuo, es decir dentro del proceso de refinamiento de crudo, como los tratamientos posteriores para que sus características sean adecuadas para aprovechamiento o disposición final.

Uno de los aspectos más relevantes de los tratamientos es conocer la condición final de los residuos, ya que depende de ello la utilidad que el mismo pueda tener. Si se tiene claro su reincorporación a que cadena productiva se realizara, también se puede definir previamente el o los tratamientos requeridos para que pueda aportar a la cadena de valor posterior.

- **Volúmenes de generación:** Este aspecto es fundamental en el enfoque del residuo, debido a que no solo se trata de reincorporación para evitar la disposición final, sino que

se debe contar con los volúmenes suficientes para que los costos que conlleven su uso puedan ser justificados. Se debe estudiar el volumen requerido de los mismos para garantizar que la sinergia entre las cadenas productivas pueda darse correctamente. En un escenario ideal, el objetivo fundamental es la disminución en la generación de residuos, sin embargo, se debe considerar que el país aún está distante de una transición energética que supla las necesidades actuales y por tanto, es más factible enfocar las estrategias en la incorporación de los volúmenes generados a sistemas que se prolonguen en el tiempo como lo es el sector vial.

Finalmente, la utilidad de implementación de estos elementos que componen el enfoque es entender más el residuo no solo como un producto en desecho, sino como una materia prima para otro ciclo productivo, y así poder definir la viabilidad de su uso no exclusivamente desde composición química, sino de otros panoramas.

### **5.3.2 Grupo de elementos de Enfoque de Proceso**

Actualmente, cualquier proceso productivo que quiera incorporar el aprovechamiento consciente y útil a su cadena debe tener en cuenta la economía circular dentro de sus componentes. En el caso de los residuos Y9+A4060 es de vital importancia tener claros elementos que impulsarían el desarrollo de prácticas viables en el marco de la economía circular, para que el enfoque se cumpla.

A continuación, se realiza una descripción del desarrollo de los elementos, que como se mencionó anteriormente, se desenvuelven a través de herramientas que se han venido desarrollando y que desde la perspectiva revisada aplican en la implementación de estos proyectos y aportan valores, métricas y balances que dan soporte a la viabilidad.

#### **➤ Eco mapas**

El Eco-mapa permite ubicar los recursos y proceso en puntos específicos del proceso, generando un diagnóstico gráfico de los flujos de importancia y relacionar rutas críticas en la aplicación. En la **Figura 24** se presenta un esquema general de Eco-mapa para el proceso de estudio, en este caso se inicia desde la explotación de hidrocarburos y su proceso de refinación que es la entrada principal del sistema, en él se encuentra un recurso priorizado, que se relaciona con la materia prima para el proceso de aprovechamiento que son los residuos generados de categoría Y9+A4060.

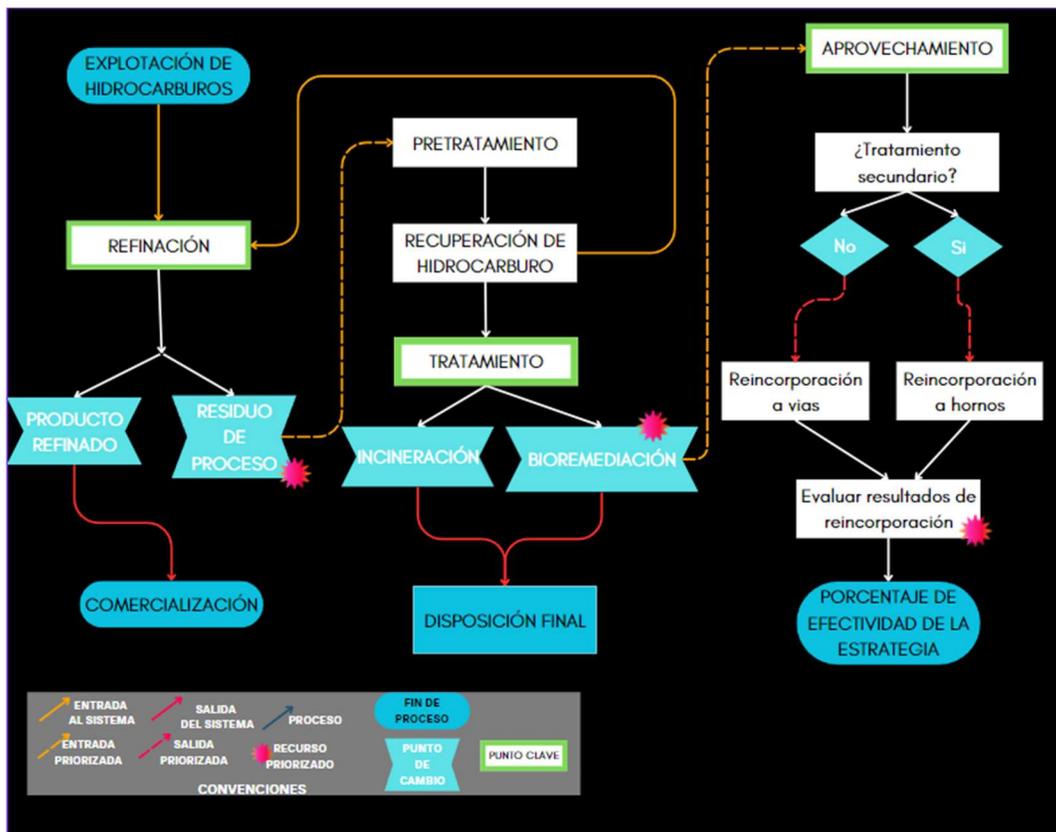
El siguiente punto clave del proceso se ubica en el tratamiento aplicado, que para este caso de mapa se divide en tres partes: el primero o pretratamiento se produce antes de llevar a un tercero autorizado; en él se recupera parte del hidrocarburo que vuelve al proceso inicial. La segunda parte o tratamiento, define de acuerdo al proceso seleccionado si se puede o no dar aprovechamiento, por esta razón y considerando que los residuos que se sometan a biorremediación son los aptos para aprovechamiento, se señala como otro recurso priorizado.

Finalmente, cuando se define el tipo de aprovechamiento que tendrá el residuo, se decide si existe una tercera etapa de tratamiento, que es especializado de acuerdo a las necesidades de la industria a la cual se vaya a reincorporar.

Dentro del diagrama de la **Figura 24**, se identificaron puntos que contienen recursos priorizados, que están relacionados con puntos de cambio que dan el insumo para siguiente paso en el mapa. Es decir, indican en que partes se están generando insumos de alta importancia para el cumplimiento de todo el proceso. Así mismo, existen entradas y salidas priorizadas, que se clasifican de esta manera debido a su influencia directa con el flujo de recursos de todo el mapa.

El Eco-Mapa también debe considerar variables como recursos adicionales a requerir, que de acuerdo al tipo pueden ser considerados en los recursos priorizados si se tratan de insumos indispensables para la obtención del residuo como materia prima. Un ejemplo de lo anterior, es para el punto clave de tratamiento cuando es Biorremediación el volumen de microorganismos utilizados para la degradación de parte del hidrocarburo, debido a que sin este insumo el proceso no puede llevarse a cabo.

Caso diferente, es cuando se consideran variables que no están relacionadas con los recursos priorizados, como agua, recurso humano, entre otros, que pueden ser parte del proceso, pero no necesariamente lo frenan en ausencia.



**Figura 24 Eco-Mapa general del proceso de residuos Y9+A4060**

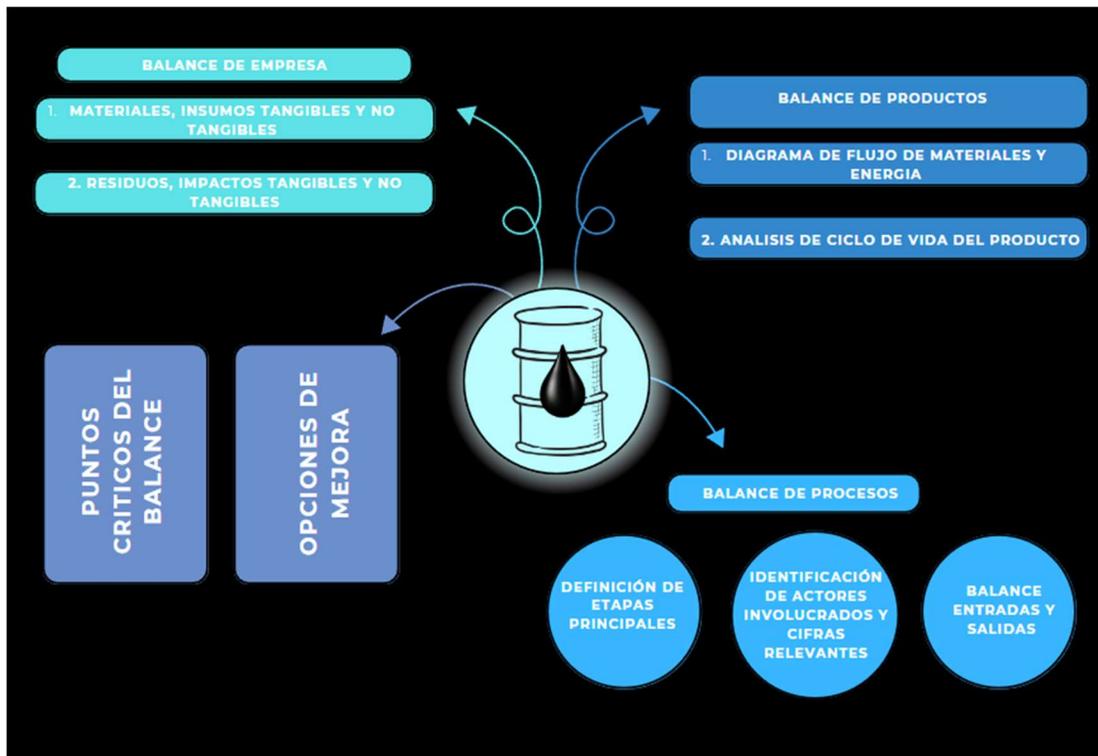
*Fuente: Elaboración propia, 2023*

El esquema general de Eco-mapa no detalla el proceso que tiene el crudo extraído hasta la obtención de los productos utilizados, porque en este caso el inicio o principal materia prima del proceso se encuentra al final de dicha obtención. La complejidad en definir los puntos clave o críticos del mapa, se basan en el conocimiento profundo del sistema y sus insumos, en el desarrollo del ciclo de vida del producto y en determinación del reúso que se le dará al mismo, pues al tener más detalles de lo anterior, se puede adaptar y ampliar el mapeo, y así identificar cada parte que tenga una oportunidad de mejora o línea de investigación progresiva.

➤ **Eco-balances**

Al ser un instrumento diagnóstico que permite la identificación de puntos críticos del proceso, será una herramienta de importancia alta ya que permite registrar, evaluar, y reflejar incluso los impactos ambientales.

En la **Figura 25** se puede observar los puntos y balances claves para la implementación de dicha herramienta en el aprovechamiento de los residuos de interés.



**Figura 25** Ejemplo de ítems para elaboración de un Eco-Balance

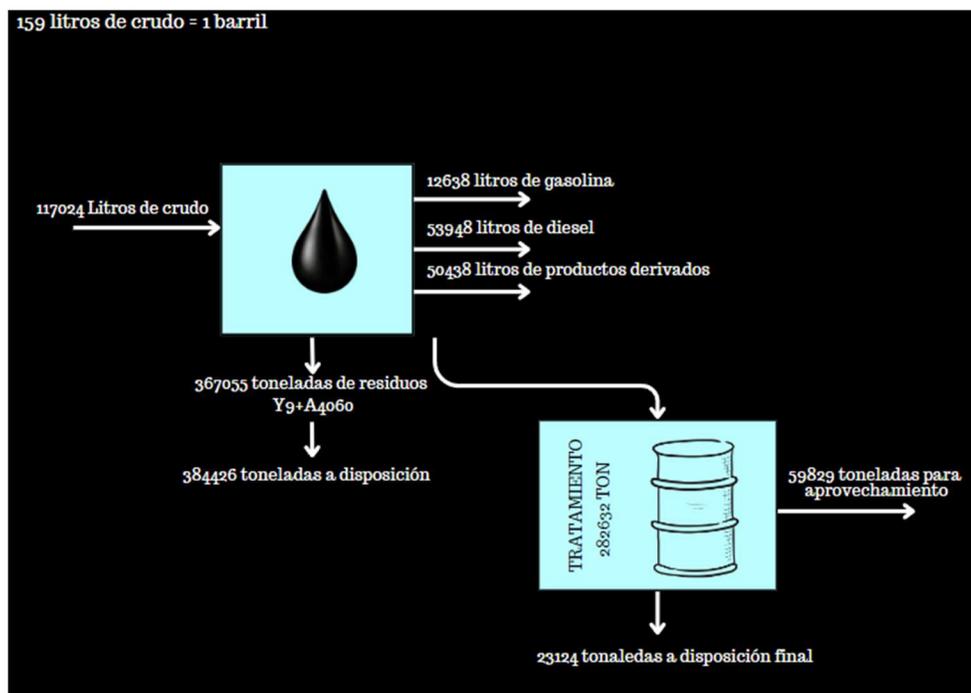
Fuente: Elaboración propia, 2023

De acuerdo con la **Figura 25**, se puede observar que se pueden realizar tres tipos de balances que están ligados entre sí, el primero es el balance de producto, que tiene un punto clave en el desarrollo de proyectos de aprovechamiento con ejes circulares y es el flujo de energía, debido a que en ocasiones como no es un producto en teoría tangible no se contabiliza; del mismo modo el análisis de ciclo de vida en este caso se debe iniciar desde el final del ciclo relacionado con obtención de crudo para comercialización. En este sentido, el análisis tendría que estar relacionado, a diferencia de los casos típicos con los flujos y procesos desde la generación del residuo de estudio hasta su reincorporación, conociendo todos los procesos y materias involucradas.

En la **Figura 26** se presenta un Eco-balance general del proceso de aprovechamiento de residuos, se considera la entrada inicial como el número de barriles reportados para el año 2021 por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) que fue de 736 Barriles, del mismo

modo de acuerdo a Asociación Colombiana del Petróleo se determinaron los porcentajes de productos o salidas obtenidas del sistema que se distribuyeron de la siguiente manera: 10.8% de gasolina, 46.1% de Diesel y 43.3% a los productos que requieren derivados de petróleo.

Para las salidas correspondientes a residuos se tuvo en cuenta la información suministrada por el IDEAM en su Informe Nacional de Residuos Peligros y que ya fueron analizados en el numeral **5.1.3 Gestión de residuos Y9 + A4060 en Colombia**. Los datos anteriores corresponden a la generación anual de 367055 toneladas, de las cuales como se observa en el balance el 23% va directo a disposición final y el 77% restante para tratamiento, de las cuales únicamente el 21% se aprovecha, y es el punto clave del balance, lograr determinar cuánto porcentaje más puede incluirse en el aprovechamiento de acuerdo a las características requeridas por la industria para reincorporación y es el punto más álgido del mismo pues da la apertura a nuevos balances enlazados con las entradas y salidas del actual.



**Figura 26 Eco-balance general del proceso de residuos Y9+A4060**

**Fuente: Elaboración propia, 2023**

El resultado final del Eco-balance, permitirá identificar los puntos críticos del proyecto, que son en teoría aquellos donde podría existir dificultades u obstáculos entendidos como

desequilibrio en el proceso. Esto tiene una función importante, ya que identificarlos puede trazar el camino para determinar nuevos procesos a incorporar o medidas de control para reducir el riesgo de aparición de un desbalance durante la ejecución.

### ➤ **Métricas circulares en los procesos**

En todo proceso deben existir métricas que permitan llevar un control desde el inicio del comportamiento del mismo. En el caso de la economía circular, las métricas están orientadas a comprender las oportunidades y riesgos del aprovechamiento, ya que adicional a la medición de los flujos físicos (de materiales, energía, agua) también se deben conocer aspectos como tasa de reúso o porcentaje de uso del producto resultante, el porcentaje de materias primas requeridas para el proceso de recuperación previo al aprovechamiento, entre otras.

En este caso específico se realiza el análisis de aplicación de la herramienta denominada CTI Tool, desarrollada por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD). Dichas métricas son útiles en la gestión para el aprovechamiento de residuos Y9+A4060 debido a que se basan en transición circular, por lo cual ayudan a comprender los riesgos y las oportunidades, priorizar acciones y establecer objetivos para monitorear el progreso en cada proyecto que se plantee.

#### **a) Indicador de cierre de ciclo - Porcentaje de circularidad del material**

El porcentaje de circularidad definido en este indicador, está relacionado con las entradas y salidas que se identificaron en el Eco-balance, y que en este caso deben ser puntuales a los procesos seleccionados para el aprovechamiento. Dentro de su aplicabilidad, permite conocer el porcentaje de flujo circular que está determinado por el porcentaje de recuperación potencial (que se centra en el diseño) y la recuperación real que se obtiene del proceso aplicable.

El cálculo, para dicho indicador se basa en la siguiente fórmula:

$$\%Circularidad = \frac{(\text{Vol entrada} * \%circular) - (\text{Vol salida} * \%circular * \%recuperación) * 100}{\text{Vol total de residuos del proceso}}$$

Vol Entrada=Volumen de entrada de residuos

*%Circularidad= Porcentaje para aprovechamiento*

*Vol Salida=Volumen de salida de residuos*

*% Recuperación= Porcentaje de recuperación para integración a otros procesos*

En este caso, por ejemplo, si tomamos como referencia para la entrada el balance generado en la **Figura 26**, un porcentaje de circularidad estimado del 76% de acuerdo al volumen finalmente tratado actualmente. Y para las salidas se estima un porcentaje de circularidad del 3% de acuerdo al total de residuos aprovechados finalmente, y la recuperación sería entre el 90-100% debido a que de acuerdo a los diferentes casos de estudios no se generan nuevos residuos. Se tendría el siguiente resultado:

$$\%Circularidad = \frac{((367055 \text{ ton} * 76\%) - (59829 \text{ ton} * 3\% * 90\%)) * 100}{426884 \text{ ton}} = 65\%$$

La práctica de este indicador en aprovechamiento de este tipo de residuos es supremamente útil, ya que permitiría definir el porcentaje de residuos que tendría una oportunidad de recirculación, proyectando un reúso, pero también considerando los aprovechamientos actuales en la métrica.

#### **b) Indicador de optimización del ciclo - Porcentaje de tipo de recuperación**

Este indicador se centra en recuperar el flujo de salida y recircularlo en la cadena de valor. El tipo de recuperación se aplica al porcentaje de recuperación real. La herramienta en línea de CTI genera automáticamente este desglose en función de los datos ingresados. Así mismo, evalúa de acuerdo a la posición del material en la cadena de valor la posibilidad de optimización para recuperación.

Debido a la necesidad de datos específicos de los procesos, este indicador se puede desarrollar únicamente con escenarios reales, ya que los cálculos como se mencionó anteriormente, se realizan a través del software. Sin embargo, se considera de gran importancia y utilidad en el desarrollo de proyectos de aprovechamiento, debido a que se pueden identificar las prácticas principales que se deben considerar para retener un mayor valor del residuo y de esa manera disminuir los impactos asociados.

### **c) Indicador de impacto del ciclo – GHG Impact**

Evaluar el impacto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en relación con el aprovechamiento de residuos Y9+A4060, puede proporcionar información sobre el alto nivel de ahorro al aplicar estrategias circulares, ya que se puede comprender mejor los beneficios en la reducción de huella de carbono, evaluar compensaciones y priorizar la mejora continua de procesos circulares en la industria. La información proporcionada por la medición del impacto de GEI destaca el potencial de mejora y se basa en el desempeño actual de circularidad de materiales de la industria en comparación con el flujo entrante 100% reciclado (WBCSD, 2019).

Las herramientas actuales se centran en medir el impacto del abastecimiento secundario de materiales técnicos, es decir, la incorporación de material reciclado a los flujos entrantes del proceso y por ende proporciona la diferencia entre la huella de emisiones de GEI actual en comparación con la inclusión de reusos en las cadenas de valor.

Es importante entender que es una herramienta para obtener información sobre el impacto en la transición de la industria de un sistema lineal a circular, proporcionar criterios para apoyar la toma de decisiones y diferenciar el impacto entre la entrada actual y la entrada con material reciclado o que se tiene proyectado aprovechar.

### **d) Indicadores económicos**

El principal criterio a tener en cuenta en la implementación de indicadores económicos, es que siempre se debe proponder por aquellos que nos muestren el costo-beneficio del proceso. Aunque es cierto que los principios ambientales deben regir el aprovechamiento, no se puede perder de vista que se trata de sectores económicos que impulsan el desarrollo y por tanto, son ellos el motor de dichas prácticas. Cuando se tiene claro el costo de, por ejemplo, el tratamiento previo, su transporte a las nuevas locaciones tanto de aprovechamiento como de reincorporación, caracterización de las muestras para garantizar las propiedades necesarias para cumplir el objetivo, entre otros ítems que se puedan evaluar se podría tener una realidad de cuánto cuesta que ese residuo se destine para aprovechamiento.

El beneficio si bien no se puede relacionar exclusivamente a temas económicos, si se debe representar en un rubro que solvente el costo, no necesariamente generando un ingreso, pero si evitando un gasto a la industria. Por ejemplo, el costo de disposición final en una

celda de seguridad, impuestos por contaminación o generación de residuos o incluso evaluar los incentivos económicos por parte del gobierno en relación a proyectos en el marco de estrategia de economía circular en el país.

Otro criterio, es el coprocesamiento, que es el compartir el costo por tratamiento y transporte de los residuos con el sector que lo incorporaría como materia prima. Es por esta razón que también se debe evaluar la industria con la que se pretenda esta sinergia, pues se requiere que sea una actividad en permanente desarrollo, pues al estar la necesidad puede consolidarse un nuevo ciclo productivo entre los dos sectores.

## 6. CONCLUSIONES

De acuerdo a la investigación realizada y los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- Los residuos peligrosos denominados Y9+A4060 tienen su origen y composición condicionada al lugar donde sean generados, ya que debido a las diferencias en la densidad API, pueden definir su factibilidad de degradación. En Colombia es más común encontrar residuos impregnados con crudo pesado, es decir, con densidades altas.
- Se puede evidenciar, de acuerdo con las estadísticas presentadas, que la generación de residuos Y9+4060 ha venido con una tendencia creciente en Colombia, con volúmenes entre los 300.000 a 350.000 toneladas por año, lo cual indica que es compleja la reducción de volumen debido a su relación directamente proporcional con la producción de hidrocarburos en el país.
- En relación con los volúmenes de residuos tratados, la cifra ha aumentado en el año 2021 en comparación con lo reportado en sus tres años anteriores en casi 50%, esto se debe a las exigencias normativas tanto nacionales como internacionales, y a la importancia de tratamiento para una disposición final más económica.
- El aprovechamiento de residuos es cada día mayor, con cifras para el año 2018 del 5% y de 72% para el año 2021, lo cual es un indicador que demuestra el interés de la industria productora de buscar métodos y sinergias para que la disposición final sea la última opción de manejo del residuo. Y que impulsa la investigación en nuevos proyectos que implique el aprovechamiento de los mismos.
- La incorporación de residuos Y9+A4060 a nuevos procesos productivos, está relacionada con su composición química, por lo cual el tratamiento de los mismos es imprescindible. Sin embargo, se debe tener claro los requerimientos de las industrias intervinientes para poder dar viabilidad a los mismos.
- El uso de los residuos como agregado para la construcción y mantenimiento de vías, tiene una proyección interesante considerando el estado actual de las vías en el país, generando una mezcla con mayor resistencia y menor requerimiento de agua para su hidratación, lo cual es positivo para el recurso hídrico pues puede disminuir la presión sobre el mismo.
- El uso de los residuos como combustible para los hornos cementeros presenta una viabilidad de aplicación alta, que tiene dos aspectos a evaluar para su aplicación

están relacionados con los residuos inertes posteriores del proceso y las emisiones atmosféricas, por lo cual es primordial garantizar el tratamiento adecuado de los residuos para así disminuir la probabilidad de ocurrencia de lo anterior.

- La aplicación de elementos tanto de enfoque en el ciclo como de proceso en la formulación de proyectos de aprovechamiento de residuos son imprescindibles como un elemento de evaluación y toma de decisiones, debido a que no se genera una proyección sesgada de las posibilidades de aplicación. Los aspectos cualitativos desde las ventajas y opciones de mejora, y los cuantitativos desde las cifras de operación y balances permiten la identificación de puntos críticos para llevar a la sostenibilidad los mismos.
- Es primordial la definición de los proyectos, desde el análisis de ciclo de vida del producto/residuos, ya que es de ese modo que se podrán definir las rutas críticas y puntos álgidos del proceso de sinergia con otras industrias y facilitar su incorporación al ciclo productivo del mismo y así dar cumplimiento al segundo principio de la Economía Circular relacionado con la optimización de rendimientos de recursos desde un alto nivel de utilidad.
- El desarrollo de Eco-balances en el diagnóstico inicial de implementación de proyectos de aprovechamiento de los residuos de estudio es indispensable, para definir la ruta de avance del mismo, considerando el equilibrio del proceso con entradas (residuo de interés, energía, agua, etc) y salidas (residuos inertes, emisiones, materiales de construcción, etc), para de esta manera generar mayor fluidez en el proceso y control en las rutas críticas del mismo.
- Las métricas circulares aplicadas a las herramientas de enfoque y balance, podrán cuantificar y calificar el grado y estado de los flujos de proceso del aprovechamiento, que implican el conocimiento y estudio de los residuos peligrosos, debido a que su complejidad en composición definirá su potencial de recuperación y con la implementación de las mismas, se podrá no solo tener datos proyectados sino datos reales que pondrán en evidencia la viabilidad o no de su uso.
- Los elementos para el aprovechamiento de residuos aceitosos propuestos, están encaminados a conocer el proceso que implica como tal dicha práctica, porque es de esa manera que pueden incluirse o adherirse enfoques de economía circular que puedan generar una mejora en la definición de las causas que acompañan el proceso y por ende prevención y/o mitigación de impactos.

## 7. RECOMENDACIONES

De acuerdo con la investigación realizada y los resultados obtenidos, surgen las siguientes recomendaciones:

- Uno de las principales limitantes para la implementación de proyectos de aprovechamiento de los residuos aceitosos, es su carácter peligroso; por lo cual es importante realizar investigaciones y pruebas de las reacciones que puedan ocurrir con la incorporación de estos residuos a otras cadenas productivas. Un ejemplo es, de acuerdo a su composición evaluar que sucede con las características que involucran la peligrosidad cuando este se aplica a vías en los procesos de escorrentía.
- El desarrollo del proceso completo que implica el aprovechamiento, con su análisis desde la producción del residuo y como punto final su incorporación a otro ciclo, es sumamente importante para la aplicación de los elementos circulares propuestos como lo son los eco-balances y métricas, debido a que es de esta manera que se puede tener una visión real de lo que implica el proyecto y todas las entradas y salidas detalladas de subprocesos que se puedan generar.
- Se recomienda, de acuerdo a los casos de éxito que se han desarrollado en el aprovechamiento de estos residuos, generar pilotos prácticos para obtener datos reales y así mismo poder aplicar de manera localizada los enfoques cualitativos y cuantitativos propuestos, para poder determinar su aplicabilidad a gran escala.
- El desconocimiento de la aplicación de herramientas de circularidad en proyectos de aprovechamiento, ha traído poco avance en su implementación. Es por esto que profundizar en la aplicación de las herramientas propuestas, a través del uso de software especializados que se han desarrollado para el análisis de circularidad en proyectos y/o empresas, es importante para lograr encontrar los vacíos en los procesos de información y considerar del mismo modo nuevas líneas de investigación que proporcionen los insumos suficientes para tener conclusiones razonables de los programas.

## BIBLIOGRAFIA

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2022). Emisiones de dióxido de carbono. *La energía y el medioambiente*, 1-5.
- Arenas, E. I. (2019). *Crudos Pesados*. Universidad Sergio Arboleda.
- Ayres, R. U., Kneese, A. V., Ayres, B. R. U., & Allen, V. (2012). *Production, Consumption, and Externalities*. 59(3), 282-297.
- Baltzua, H. (2017). Identificación y Valoración de aspectos ambientales. En *Goldfields* (Vol. 4, Número 1).
- Carrasco, A. L. de los Á., & Rodríguez Mondragón, E. K. (2022). Incineración de residuos peligrosos. Revisión sistemática 2022. *Repositorio Institucional - UCV*, 0-3.
- Colombia Productiva. (2015). Guía empresarial. En *Guía empresarial Economía Circular*.
- CONPES. (2011). *CONPES 3700: Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia*.
- Díaz, V., & Puyo, M. (2021). Diseño de planta de incineradora para residuos peligrosos, bajo tratamiento térmico autosuficiente en la ciudad de Bogotá. *Universidad Distrital*.
- DNP. (2011). Documento Conpes - Consejo Nacional de Política Económica y Social. 102, 43.
- Eche, J. E. (2003). Tratamiento Y Disposición Final De Residuos Industriales Generados En Una Refinería. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 6(11), 20-31.
- Ecopetrol. (2018). *Combustóleo (fuel oil No. 6)*. 6, 1-2.
- Ellen McArthur Foundation. (2021). *Objetivos universales para políticas de economía circular*.
- Gallopín, G. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*.
- Gobierno de España. (2023). *Dióxido de azufre*.
- Gómez, L. J., & Gómez, M. P. (2016). Métodos utilizados para el tratamiento de las borras de tanques de almacenamiento en la industria del petróleo. *Ingenierías USB Cartagena*, 1-55.
- IDEAM. (2019). Informe Nacional de Residuos o Desechos peligrosos en Colombia 2018. En *IDEAM*.
- IDEAM. (2022). *Informe nacional de la generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia 2021*.

- La Verde Spano, S., & Taylhardat, L. (2015). Diseño de un incinerador de lecho fluidizado para procesar desechos sólidos orgánicos. *Enfoque UTE*, 6(3), 81-95. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n3.71>
- MADS. (2019). Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio. En *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
- Molina, G. (2011). ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL USO DE RESIDUOS ACEITOSOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNO DE UN HORNO CEMENTERO. En *UNIVERSIDAD ICESI*. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Moscoso, L. (2019). Evaluación de la bioaumentación empleando consorcios bacterianos en la degradación de borras aceitosas provenientes de la industria petrolera laura victoria moscoso urdaneta. En *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Nandakumar, V., & Jayanthi, J. (2016). Hydrocarbon Fluid Inclusions, API Gravity of Oil, Signature Fluorescence Emissions and Emission Ratios: An Example from Mumbai Offshore, India. *Energy & Fuels*, 30. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02952>
- Ochoa Arango, N. (2009). ALTERNATIVA DE USO PARA LOS RESIDUOS HIDROCARBURADOS. En *Escuela de Ingeniería de Antioquia* (Vol. 2, Número 1).
- ONU. (2020). Informe de los objetivos de desarrollo sostenible. En *Organización de Naciones Unidas*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv14t4706>
- ONU, O. de N. U. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL. En *Publicación de las Naciones Unidas*.
- ONU, O. de N. U. (2019a). ODS 9 : Construir infraestructuras resilientes , promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación en América Latina y el Caribe 1 ODS 9. *Agenda 2030 para el Desarrollo sostenible*, 3.
- ONU, O. de N. U. (2019b). ODS 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos en América Latina y el Caribe. *Cepal.org*.
- Peña, V. D. (2019). ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE CO-PROCESAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA. En *Universidad Científica del Sur. Facultad de Ciencias Ambientales. Ingeniería Ambiental*.
- Rengifo, M. C. (2018). EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA BIOAUMENTACIÓN CON HONGOS DURANTE LA DEGRADACIÓN DE BORRAS ACEITOSAS DE LA INDUSTRIA PETROLERA. En *Univeridad Nacional de Colombia, UNAL*. UNAL.
- Política ambiental para la gestión integral de residuos peligrosos y Plan de Acción 2022-2030, 1 (2022).

VALBUENA ROJAS, D. S., & SIERRA GONZÁLEZ, J. M. (2015). DISEÑO DE UNA MEZCLA ENTRE MATERIAL GRANULAR Y BORRAS PETROLERAS PARA USO COMO CAPA GRANULAR EN UNA ESTRUCTURA DE VÍA. En *Universidad Distrital Francisco Jose De Caldas*.

WBCSD. (2019). *CIRCULAR TRANSITION INDICATORS V3.0* (Número July).

Windman Internacional. (2018). *DENSIDAD API*.

Wright, V. P. (1986). *World Energy Outlook*.