



**Valorización de los Residuos de Construcción y Demolición Generados en la  
Construcción de una Terminal Portuaria Multipropósito en el Caribe Colombiano: Caso  
de Estudio Puerto Antioquia, Golfo de Urabá**

Moisés Marín Agudelo

Ingeniero sanitario

Semestre de Industria

Wilfer David Guzmán López, Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Ingeniería Sanitaria

Medellín - Antioquia

2025

<b>Cita</b>	(Marín, 2025)
<b>Referencia</b>	(Marín, 2025). <i>Valorización de los Residuos de Construcción y Demolición Generados en la Construcción de una Terminal Portuaria Multipropósito en el Caribe Colombiano: Caso de Estudio Puerto Antioquia, Golfo de Urabá</i> , [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Se dedica este trabajo y todo el esfuerzo requerido a las personas más importantes en mi vida, las cuales no dejaron de apoyarme a lo largo de mi trasegar académico y personal: mi madre Aura Milena en primera instancia, mi faro y motivación, aquella que con su amor y exigencia me mantuvo toda la vida con un pie en el orden y el otro en el caos, justo como se debe estar, en un perfecto balance; mis abuelas, tanto Adriana, como Clemencia y Beatriz, ¿Qué se puede decir de las ellas? Son un tesoro invaluable; mi novia, Mariana, que me ayudó a crecer personalmente en los últimos dos años, haciéndolos mucho más hermosos; mi padre Fredy, un grato ejemplo de amor constante; mis abuelos; Manuel, Ariel y Leonardo, mi sangre, y mis compañeros de vida; mis tíos, y a la vez mis mejores amigos, Leonardo y Alejandro, su disciplina y brillantes viven en mí; mi hermanito Samuel, un regalo increíble de la vida; Aurushka, mi amiga y fiel confidente; mis angelitos peludos, Bruno y Princesa, quienes me vieron crecer día a día; mis otros tíos Pablo y Chowal, a quienes admiro profundamente; y para culminar, todos mis amigos y docentes, que me acompañaron en el camino... ¡Esto va por ustedes!

## **Agradecimientos**

El proceso de prácticas académicas fue enriquecedor tanto en el ámbito personal como en el profesional, por ende quiero agradecer a las personas que pusieron su granito de arena para que fueran posibles: a la causante de mi aventura, mi madre, Aura, quien me dio el empujón inicial que necesitaba para tomar la decisión de alejarme del nido y me acompañó moralmente en el proceso; a mi abuelos, Ariel, Beatriz y Adriana, y a mi novia Mariana, que nunca dejaron de apoyarme en todos los sentidos posibles; a mis jefes, Jorge Restrepo, Álvaro Perdomo y Alejandra Maz, pues más que simples superiores en la jerarquía laboral, se convirtieron en mis amigos y referentes, e hicieron que mi caminar fuera maravilloso; a Andrés Restrepo y Ramiro Salazar, quienes inicialmente confiaron en mí para el cargo; a todos mis amigos de la etapa universitaria, ellos hicieron de estos años un tiempo maravilloso, en el que reímos, nos preocupamos y nos mantuvimos unidos para triunfar; a mi asesor interno, Wilfer, que cada semana me motivó para la elaboración de este trabajo; a todos los docentes de esta bella etapa, que con la mejor disposición sembraron la semilla del conocimiento en mí; y finalmente, a mis ángeles, Manuel, Bruno, Clemencia y Princesa, ¡su legado vive en mí; ... ¡El agradecimiento es eterno!

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	13
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivo general .....	16
2.2. Objetivos específicos .....	16
3. Marco teórico .....	17
4. Metodología .....	22
4.1. Generalidades del proyecto .....	22
4.2. Procedimiento metodológico .....	27
4.2.1. Fase 1: Obtención de información.....	28
4.2.2. Fase 2: Manejo y consolidación de la información, y diagnóstico del manejo interno actual de los RCD pétreos.....	36
4.2.3. Fase 3: Evaluación ambiental a través de la contabilidad de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	46
5. Análisis de resultados.....	52
5.1. Resultados de la Fase 1: Obtención de información .....	52
5.1.1. Selección de la alternativa óptima para el tratamiento de los RCD pétreos generados en Puerto Antioquia y hallazgos preliminares del manejo ambiental.....	52
5.1.2. Cotización de alternativas de reciclaje de los RCD generados en el área de estudio .....	55
5.2. Resultados de la Fase 2: Manejo y consolidación de la información, y diagnóstico del manejo interno actual de los RCD pétreos .....	59
5.2.1. Resultados del índice del manejo ambiental de los RCD pétreos generados en la plataforma <i>onshore</i> de Puerto Antioquia .....	59
5.2.2. Estimación de RCD pétreos generados, concreto fabricado y de agregados adquiridos en el proyecto Puerto Antioquia en el periodo de análisis .....	66
5.2.3. Elección de la mejor maquinaria entre las alternativas cotizadas .....	68

5.3. Resultados de la Fase 3: Evaluación ambiental a través de la contabilidad de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	71
5.3.1. Determinación de distancias para los trayectos ligados al transporte .....	71
5.3.2. Consumo de combustible para las fuentes móviles y de combustión estacionaria .....	73
5.3.3. Adecuación de los datos para la contabilidad de emisiones: escenario “ <i>sin reciclaje de RCD pétreos</i> ” .....	73
5.3.4. Adecuación de los datos para la contabilidad de emisiones: escenario “ <i>con reciclaje de RCD pétreos</i> ” .....	75
5.3.5. Elección de los factores de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	76
5.3.6. Contabilidad de emisiones de CO <sub>2</sub> de ambos escenarios: “ <i>sin reciclaje</i> ” y “ <i>con reciclaje</i> ” .....	78
6. Conclusiones .....	85
Referencias .....	90
Anexos.....	93

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Tipos de RCD susceptibles de aprovechamiento según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.....	18
<b>Tabla 2.</b> Equipos de la interventoría .....	26
<b>Tabla 3.</b> Informes que debe revisar y/o redactar la interventoría .....	27
<b>Tabla 4.</b> Acopios de RC en la plataforma onshore del proyecto Puerto Antioquia .....	30
<b>Tabla 5.</b> Criterios utilizados para calificar los acopios de RC en la zona de estudio.....	37
<b>Tabla 6.</b> Puntaje de calificación. ....	37
<b>Tabla 7.</b> Criterios de asignación del puntaje.....	38
<b>Tabla 8.</b> Rangos de calificación para el manejo ambiental .....	39
<b>Tabla 9.</b> Clasificación de los acopios respecto a cada criterio. ....	41
<b>Tabla 10.</b> Matriz de información recopilada de generación de RCD y de demanda de material de cantera.....	42
<b>Tabla 11.</b> Rangos de calificación para el manejo ambiental .....	43
<b>Tabla 12.</b> Descripción relacionada a cada número entero de la escala usada para darle un peso a cada criterio. ....	44
<b>Tabla 13.</b> Encuesta utilizada para la asignación del peso de cada criterio. ....	44
<b>Tabla 14.</b> Descripción relacionada a cada número en la escala de clasificación, por criterio, de cada alternativa. ....	45
<b>Tabla 15.</b> Modelo de la matriz de decisión ponderada.....	45
<b>Tabla 16.</b> Modelo de la tabla de información de los trayectos. ....	46
<b>Tabla 17.</b> Procedimiento para el consumo de combustible del vehículo de transporte. ...	47
<b>Tabla 18.</b> Explicación de los escenarios planteados. ....	48
<b>Tabla 19.</b> Cantidades de RCD y material de cantera, y datos necesarios del equipo de trituración en el escenario “sin reciclaje de RCD”.....	49
<b>Tabla 20.</b> Cantidades de RCD y material de cantera, y datos necesarios del equipo de trituración en el escenario “con reciclaje de RCD”.....	49
<b>Tabla 21.</b> Datos necesarios para el cálculo de emisiones de CO <sub>2</sub> de fuentes móviles.....	50

<b>Tabla 22.</b> Cálculos para la contabilidad de emisiones de CO <sub>2</sub> de las actividades de transporte y trituración para ambos escenarios planteados.....	51
<b>Tabla 23.</b> Información relevante sobre las compañías y las soluciones cotizadas.....	58
<b>Tabla 24.</b> Datos requeridos por los proveedores de maquinaria para realizar las cotizaciones.....	59
<b>Tabla 25.</b> Número de inspecciones realizadas a cada acopio en el periodo de reporte.....	61
<b>Tabla 26.</b> Resultado del índice por acopio .....	63
<b>Tabla 27.</b> Resultado del índice por criterio.....	64
<b>Tabla 28.</b> Clasificación de los acopios respecto a cada criterio.....	64
<b>Tabla 29.</b> Generación de RCD y cantidad de material de cantera requeridos en Puerto Antioquia en el periodo de evaluación del presente caso de estudio. ....	67
<b>Tabla 30.</b> Peso correspondiente a la relevancia de cada criterio.....	69
<b>Tabla 31.</b> Trayectos definidos para la medición de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	72
<b>Tabla 32.</b> Consumo de combustible para las fuentes móviles .....	73
<b>Tabla 33.</b> Datos de cantidades de material y del equipo de trituración asociados a la medición de emisiones de CO <sub>2</sub> (escenario “sin reciclaje”).....	74
<b>Tabla 34.</b> Datos de cantidades de material, distancias recorridas y del equipo de trituración asociados a la medición de emisiones de CO <sub>2</sub> (escenario “con reciclaje”). ....	76
<b>Tabla 35.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> sin el reciclaje de RCD pétreos generados en Puerto Antioquia.....	78
<b>Tabla 36.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> reciclando los RCD pétreos generados en Puerto Antioquia. ....	79
<b>Tabla 37.</b> Anexos .....	93

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Clasificación y jerarquía de los RCD para tener en cuenta para este documento .....	14
<b>Figura 2.</b> Ubicación del proyecto en el departamento de Antioquia.....	23
<b>Figura 3.</b> Proyecto Puerto Antioquia (detalle).....	23
<b>Figura 4.</b> Plataforma onshore de la etapa constructiva de Puerto Antioquia .....	24
<b>Figura 5.</b> Plataforma onshore de Puerto Antioquia, línea eléctrica y corregimiento Nueva Colonia.....	25
<b>Figura 6.</b> Organigrama del proyecto .....	26
<b>Figura 7.</b> Esquema del procedimiento metodológico.....	28
<b>Figura 8.</b> Ubicación de los acopios de RCD y frentes de trabajo en la plataforma onshore de Puerto Antioquia. ....	33
<b>Figura 9.</b> Rutas de inspecciones ambientales en la plataforma onshore de Puerto Antioquia .....	34
<b>Figura 10.</b> Proceso de recolección de datos cuantitativos de generación de RCD, de los Informes Mensuales de Cumplimiento de los Contratistas .....	35
<b>Figura 11.</b> Proceso de recolección de datos cuantitativos de generación de RCD, de los ICA .....	35
<b>Figura 12.</b> Captura de pantalla del formato de calificación semanal. ....	40
<b>Figura 13.</b> Camisas para pilotes.....	52
<b>Figura 14.</b> Vigas longitudinales para el viaducto. ....	52
<b>Figura 15.</b> Área de prefabricados; donde se fabrican las camisas para pilotes. ....	53
<b>Figura 16.</b> Área de pretensado; donde se culmina la fabricación de las vigas. ....	53
<b>Figura 17.</b> Derrame de concreto en Mejor Esquina. ....	53
<b>Figura 18.</b> Recolección de derrame de concreto.....	53
<b>Figura 19.</b> RCD pétreos generados; acopio 1.....	54
<b>Figura 20.</b> RCD pétreos generados; acopio 2.....	54
<b>Figura 21.</b> Trituradora de mandíbula Lockotrack LT106 .....	56



<b>Figura 22.</b> Trituradora de cono Lockotrack LT200HP .....	56
<b>Figura 23.</b> Frente de trabajo del Acopio 5 el 07/11/2024; ya no se ejecutaban actividades generadoras de RCD pétreos.....	62
<b>Figura 24.</b> Captura de pantalla de la matriz de decisión ponderada del proyecto .....	70
<b>Figura 25.</b> Ubicación de los puntos destacados.....	72
<b>Figura 26.</b> Factor utilizado para las emisiones de CO <sub>2</sub> de fuentes móviles (utilizado para la actividad del transporte).....	77
<b>Figura 27.</b> Factor utilizado para las emisiones de CO <sub>2</sub> de la combustión estacionaria (utilizado para la actividad del reciclaje - trituración).....	77
<b>Figura 28.</b> Comparativa entre las emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas al transporte de RCD para ambos escenarios planteados. ....	80
<b>Figura 29.</b> Comparativa entre las emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas al transporte de material de cantera para ambos escenarios planteados.....	80
<b>Figura 30.</b> Comparativa entre las emisiones totales de CO <sub>2</sub> para ambos escenarios planteados. ....	81
<b>Figura 31.</b> Diferencia entre los valores de emisiones de CO <sub>2</sub> entre ambos escenarios.....	82
<b>Figura 32.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> mes a mes con reciclaje de RCD pétreos. ....	83
<b>Figura 33.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> mes a mes sin reciclaje de RCD pétreos. ....	83

### **Lista de ecuaciones**

<b>Ecuación 1.</b> Calificación semanal para cada acopio. ....	40
<b>Ecuación 2.</b> Calificación semanal para cada criterio.....	40
<b>Ecuación 3.</b> Calificación general para cada acopio.....	40
<b>Ecuación 4.</b> Calificación general para cada criterio.....	41
<b>Ecuación 5.</b> Calificación de los acopios para cada criterio. ....	41
<b>Ecuación 6.</b> Generación de RCD mensual en ausencia de un dato oficial confiable.....	42
<b>Ecuación 7.</b> Calificación de cada alternativa de maquinaria cotizada. ....	46

### Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>ANI</b>	Agencia Nacional de Infraestructura.
<b>ANLA</b>	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
<b>COTEMA</b>	Consortio Terminal Marítimo de Antioquia.
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono.
<b>E&amp;S</b>	Ambiental y Social (Environmental and Social).
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency).
<b>H&amp;S</b>	Salud y Seguridad (Health and Security).
<b>ICA</b>	Informe de Cumplimiento Ambiental.
<b>IDB</b>	Banco Interamericano de Desarrollo.
<b>IFC</b>	Corporación Financiera Internacional.
<b>RCD</b>	Residuos de Construcción y Demolición.
<b>RC</b>	Residuos de Concreto.
<b>PBCU</b>	Puerto Colombia Bahía de Urabá.
<b>PMA</b>	Plan de Manejo Ambiental.

---

## Resumen

Los residuos de construcción y demolición (RCD), generados en la industria de la construcción, han cobrado relevancia en la transición hacia una economía circular. Entre los RCD aprovechables están los pétreos, que incluyen residuos de concreto (RC), de los cuales se pueden obtener agregados finos y gruesos, además de estructuras prefabricadas como ladrillos y bloques para andenes. Durante el periodo de prácticas, se apoyó a la interventoría del proyecto puerto Antioquia mediante visitas de inspección periódicas y gestión documental. Estas funciones permitieron caracterizar el manejo ambiental de los RCD pétreos generados en la etapa constructiva del proyecto, y proponer una alternativa para su reciclaje. Se identificó que la segregación en la fuente y la frecuencia de recolección eran fortalezas, mientras que aspectos como el drenaje y la dispersión de partículas requerían mejoras. Además, se evaluó si con la alternativa reducía las emisiones de carbono asociadas al transporte de material de cantera, transporte de RCD pétreos y trituración, para ello se definieron y compararon dos escenarios hipotéticos: “*con reciclaje de RCD*” y “*sin reciclaje de RCD*”. La disminución total de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre los escenarios hipotéticos planeados fue del 4,41 %, en favor del escenario “*con reciclaje de RCD*”, y siendo el transporte de material de cantera el mayor contribuyente, con el 84,58 % de la reducción, en favor del escenario en que se reciclan los RCD pétreos.

*Palabras clave:* Economía circular, residuos de construcción y demolición, concreto, reciclaje, emisiones de carbono.

---

### **Abstract**

Construction and demolition waste (CDW), generated by the construction industry, has gained relevance in the transition towards a circular economy. Among the recyclable CDW, stone-based materials, including concrete waste (CW), stand out as sources of fine and coarse aggregates, as well as prefabricated structures such as bricks and sidewalk blocks. During the internship period, support was provided to the project Puerto Antioquia oversight through periodic inspection visits and document management. These tasks enabled the characterization of the environmental management of stone-based CDW generated during the construction phase of the project and facilitated the proposal of a recycling alternative. It was identified that source segregation and collection frequency were key strengths, whereas aspects such as drainage and particle dispersion required improvement. Additionally, the recycling alternative was evaluated to determine whether it reduced carbon emissions associated with quarry material transportation, stone-based CDW transportation, and crushing processes. To this end, two hypothetical scenarios were defined and compared: “with CDW recycling” and “without CDW recycling.” The total reduction in carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions between the hypothetical scenarios was 4,41%, in favor of the “RCD recycling' scenario”, with quarry material transportation being the largest contributor, accounting for 84,58% of the reduction, favoring the scenario involving the recycling of stone-based CDW.

*Keywords:* Circular economy, construction and demolition waste, concrete, recycling, carbon emissions, crushing and transport.

---

## 1. Introducción

La economía lineal, se ha afianzado, históricamente, en el seno del sector productivo; el siglo pasado, sin embargo, pocas ocasiones se aplicaron esfuerzos para sacar provecho del potencial que tienen los residuos de los procesos productivos para ser recuperados e introducidos nuevamente en el ciclo. Desde esta perspectiva se ha construido la visión del desarrollo. Extracción, procesos, producción, uso y el término de la vida útil; son las etapas por las que pasan gran parte de los recursos que se extraen de la tierra. Para 2015, el flujo total en la economía constaba de 102,3 billones de toneladas de recursos extraídos de la tierra, de los cuales, 41,8 billones de toneladas eran arenas, arcillas y materiales pétreos destinados a la construcción; cuando el ciclo de estos llega a su fin, por lo general, son dispuestos en vertederos (Kunzig, 2020).

La escasez de recursos naturales se perfila como una de las principales problemáticas globales en los próximos años. Por esta razón, es crucial avanzar hacia un modelo productivo en el cual la economía circular emerja como una necesidad imperiosa en las agendas ambientales de los países. Existe una cantidad significativa de materiales que, una vez alcanzada su vida útil o como remanentes de procesos productivos, cuentan con un gran potencial de reutilización, por ejemplo, los plásticos, los residuos orgánicos, metales, entre otros. Es necesario destacar los residuos generados en la construcción y demolición, dado que constituyen la fracción más voluminosa y con mayor peso dentro de los de desperdicios en la economía (Ginga et al., 2020).

Las obras civiles de gran envergadura representan una fuente considerable de RCD. Dependiendo de la magnitud del proyecto, se utilizan grandes volúmenes de materiales, como crudo de río (para llenos, sobrecargas, fabricación de agregados, entre otros usos), metales y madera, y plástico, de los cuales una porción significativa se convierte en RCD. El método tradicional para la disposición final de los RCD pétreos, como los remanentes de hormigón y concretos hidráulicos, suele ser la utilización de vertederos o escombreras. Esta práctica genera un alto impacto ambiental debido al uso intensivo del suelo y a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del transporte de estos materiales desde el sitio de construcción hasta su destino final.

El tratamiento y aprovechamiento de los RCD se ha venido explorando y aplicando satisfactoriamente en numerosos países; RCD pétreos han sido materia prima en procesos de transformación emergentes en el mercado, produciéndose agregados finos y gruesos, material

disponible para llenos y sobrecargas en obras civiles y, bloques prefabricados como ladrillos. El acondicionamiento y tratamiento de los RCD pétreos varía en función de su tipo y homogeneidad, así como de la calidad requerida para los nuevos productos, la cual estará determinada por el uso final que se les asigne.

Esta propuesta de prácticas se centra en el planteamiento de una alternativa para el tratamiento y aprovechamiento de los RCD pétreos generados en la etapa de construcción de una mega obra de ingeniería como Puerto Antioquia, la primera terminal portuaria multipropósito en el departamento de Antioquia; esta se encuentra ubicada en el costado sur oriental del Golfo de Urabá, en jurisdicción del municipio de Turbo (ver *Figura 2*). De igual manera se realiza un análisis costo - beneficio entre los posibles escenarios: (1) implementando la alternativa propuesta y, (2) continuar disponiendo los residuos de interés en la escombrera más cercana, ubicada en el municipio de Apartadó.

**Figura 1.** Clasificación y jerarquía de los RCD para tener en cuenta para este documento



Elaboración propia, 2024.

Nota: Los residuos del concreto están incluidos dentro de los RCD pétreos, estos a su vez están contenidos en los RCD generales.

A lo largo del proceso de prácticas, y desde la interventoría del proyecto, se aplican los conocimientos interiorizados en los semestres universitarios para el desarrollo de una perspectiva crítica que sea útil en el análisis de las problemáticas ambientales que se presentan en la fase constructiva del proyecto, y que se pueden apreciar en las visitas de inspección en los frentes de obra. Este trabajo de campo se complementa con la gestión de informes periódicos de cumplimiento y demás documentos de seguimiento del manejo ambiental que se presentan ante diferentes organizaciones y autoridades, nacionales e internacionales que hacen auditoria al proyecto.

Adicionalmente se plantea la hipótesis de que la porción de RCD correspondiente a los RCD pétreos generados en la plataforma en tierra del proyecto (plataforma onshore) pueden ser gestionados de una manera que se incentive la economía circular dentro de la obra, trayendo

---

consigo beneficios: (1) ambientales, para el medio ambiente y la reputación del proyecto, y (2) económicos, para los contratistas y la sociedad portuaria.

En este sentido, el tratamiento y aprovechamiento de los RCD pétreos no solo trae consigo beneficios directos en términos de reducción de residuos y optimización de recursos, sino que también puede jugar un papel crucial en la disminución de las emisiones de GEI generadas durante el proceso de construcción. Al reutilizar los materiales generados en la misma obra, se minimizan las necesidades de transporte hacia vertederos distantes. Además, la reincorporación de estos residuos en nuevos productos de construcción reduce la dependencia de materiales vírgenes, cuyas actividades de extracción y procesamiento suelen ser intensivas en emisiones (Yuan et al., 2024). Evaluar las alternativas de gestión de los RCD, en términos de sus emisiones de GEI, permite identificar las opciones que no solo favorecen la eficiencia económica, sino que también contribuyen a una construcción más sostenible, alineada con los objetivos globales de mitigación del cambio climático

---

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Desarrollar el análisis de un proceso propuesto para el manejo de los RCD pétreos generados durante la construcción de una terminal portuaria multipropósito en la subregión del Urabá antioqueño, con un enfoque en su reintegración en la cadena productiva.

### 2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la gestión de los RCD pétreos generados en la etapa constructiva de la plataforma *onshore* del proyecto Puerto Bahía Colombia de Urabá, a través de una comparación entre lo evidenciado en las visitas de inspección y lo estipulado en el PMA de residuos sólidos peligrosos, no peligrosos y especiales del proyecto.
- Proponer una alternativa para el reciclaje en la misma obra de los RCD pétreos generados en el área de estudio.
- Evaluar ambientalmente la alternativa propuesta para la actividad del reciclaje de los RCD pétreos dentro de la plataforma onshore de Puerto Antioquia, a través de la medición de las emisiones de carbono.



---

### 3. Marco teórico

Los residuos sólidos representan una significativa fuente de contaminación que afecta diversas matrices ambientales, incluyendo el agua, el suelo y el aire (Odabas, 2007). Desde su generación hasta la disposición final, su manejo conlleva múltiples impactos ambientales, como la emisión de metano y otros GEI, el uso del suelo y la producción de lixiviados. Comúnmente, los residuos sólidos municipales son dispuestos en rellenos sanitarios, debido el relativo bajo costo de este método de disposición final (Kunzig, 2020). Otras áreas de especial interés son las escombreras; allí es a donde se llevan los RCD, uno de los tipos de residuos más abundantes globalmente (Ginga et al., 2020).

Según Shen et al, 2004, los RCD son aquellos residuos sólidos generados en las industrias de la construcción. Sin embargo, las definiciones varían según la fuente de generación; por ejemplo, autores como Tchobanoglous et al., 1997 hacen la salvedad de que los residuos de demolición son aquellos generados a partir de estructuras demolidas; mientras que los residuos de la construcción son los producidos durante la construcción y renovación de edificios o demás obras civiles. Actividades como la construcción de nuevas obras, renovación, demolición, limpieza y excavación, traen consigo RCD (Lu et al., 2021; Yuan et al., 2024).

Algunas de las operaciones o actividades de construcción – renovación que conllevan a la generación de RCD son la limpieza de terrenos (descapote), construcción de carreteras y edificios, excavación o nivelación de terrenos y actividades de demolición (U.S Environmental Protection Agency [U.S EPA], 1998). De acuerdo con Ginga et al., 2020; Elshaboury et al., 2022, los residuos de construcción y demolición representan más del 30% del total de residuos sólidos generados en todo el mundo; en 2019, China, Estados Unidos y la Unión Europea fueron los mayores generadores, produciendo 2.300 millones, 600 millones y 834 millones de toneladas respectivamente.

El manejo de los RCD es un tema interdisciplinar que aborda complejos desafíos desde las perspectivas de la ingeniería, la gestión y la tecnología (Marrero et al., 2017). Mundialmente, un manejo integral y sostenible de los RCD es una estrategia ambiental de alta importancia; de acuerdo con Yuan et al., 2024, la generación y recolección, clasificación, transporte, reutilización, reciclado, depósito en vertederos e incineración son las actividades que engloba un manejo ambientalmente responsable de los RCD, y claramente, esto trae consigo una debida planeación y

monitoreo. Una correcta gestión de este tipo de material de descarte se hace a través de los PMA de cada proyecto, que deben ser elaborados e implementados por los generadores, de acuerdo con las guías y legislación de RCD que apliquen para el área donde se desempeñe dicho generador. Estos tienen que estar enfocados en la prevención y la reducción de RCD; a su vez velar por el tratamiento, aprovechamiento o reutilización de estos, y a su vez garantizar una disposición final adecuada (MADS, 2017).

Los diferentes tipos de RCD susceptibles de aprovechamiento se pueden apreciar en la **Tabla 1**). Cabe aclarar, que los RC son los que generan mayor relevancia debido a su alta generación e impacto ambiental, tanto en los sitios de obra como en las escombreras (Nedeljković et al., 2021).

**Tabla 1.** *Tipos de RCD susceptibles de aprovechamiento según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*

Tipos de RCD aprovechables, según la normativa colombiana para la gestión de los RCD (Resolución 0472 de 2017)	
Productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terreno	Coberturas vegetales, tierras, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros.
Productos de cimentaciones y pilotajes: arcillas, bentonitas y demás.	Arcillas, bentonitas y demás.
RCD pétreos	Hormigón, arenas, gravas, gravillas, cantos, pétreos asfálticos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, entre otros.
RCD no pétreos	Vidrio, metales como acero, hierro, cobre, aluminio, con o sin recubrimientos de zinc o estaño, PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno y de poliuretano, gomas y cauchos, compuestos de madera o cartón-yeso (drywall), entre otros.

Adaptado de MADS, 2017.

La tasa de recuperación de RCD varía considerablemente entre países, siendo Japón un ejemplo destacado con una tasa superior al 90%, mientras que en India es inferior al 10% (Ferronato, 2022). En la Unión Europea, por ejemplo, solo el 12.5% se destina a disposición final, siendo el resto reciclado (Ulsen et al., 2021). En países en desarrollo, la baja recuperación se

---

atribuye a la falta de infraestructura de acopio y tratamiento, así como a limitaciones en el mercado para los materiales reciclados (Mihai, 2019).

Los residuos del concreto son los RCD que se generan en mayor cantidad, debido a su peso y volumen. El potencial de reutilización para este tipo de residuos es elevado. En 2015, en los Estados Unidos se registró un flujo de aproximadamente 381 millones de toneladas de RC, de las cuales 66 millones fueron dispuestas en escombreras y 315 millones tuvieron un segundo uso. Del tratamiento de 284 millones de toneladas de RC, el producto final consistió en agregados finos y gruesos, mientras que los 31 millones de toneladas restantes se aprovecharon como prefabricados (U.S. EPA, 2015).

Se han llevado a cabo estudios que analizan el potencial de aprovechamiento de los residuos de construcción, evaluando diversas posibilidades de reutilización. Entre los usos más destacados se encuentran su empleo como materia prima para agregados finos y gruesos, la fabricación de placas suelo-cemento, bloques prefabricados, aplicación como material de base y subbase en carreteras, entre otros (Chica & Beltrán, 2018)

En lo concerniente a la utilización de los RC para producir agregados, las investigaciones se han enfocado principalmente en la determinación de las propiedades finales del concreto producido con los áridos reciclados (Chica & Beltrán, 2018). Propiedades como la porosidad, la forma, esfericidad y el tamaño de la partícula se evalúan para determinar la calidad del producto obtenido. De igual manera, evaluar las características del residuo a tratar es determinante para la producción de un material competente en el mercado (Rodrigues et al., 2013). Particularmente la presencia de pasta de cemento en los RC es una problemática; la homogeneidad del residuo a tratar es un factor determinante en la fabricación de agregados finos y gruesos idóneos para la reincorporación al ciclo productivo (Ulsen et al., 2021).

El RC generado en las plantas de concreto ha sido utilizado con éxito en la fabricación de bloques no estructurales sometidos a poca carga, logrando propiedades mecánicas favorables (Kou et al., 2012).

El suelo – cemento es igualmente una aleación que puede realizarse a partir de RC; es una mezcla compuesta por agregados gruesos, cemento y agua; el producto de esta incorporación es duradero y resistente; idóneo para la construcción de carreteras, el control de la erosión y la cimentación de edificaciones (Renolith, 2023). En relación con la producción de suelo-cemento a partir de agregados reciclados de RC, se ha investigado el tamaño óptimo de partícula del agregado

---

y la proporción adecuada de la mezcla. En el estudio realizado por Jayasinghe et al., 2016, se llevaron a cabo pruebas de compresión y tensión en especímenes con diferentes proporciones de materiales y tamaños de agregados reciclados, los resultados fueron satisfactorios respecto a los estándares de evaluación.

Técnicas de tratamiento también han sido investigadas para producir los agregados. Este proceso consiste en la segregación y, posterior trituración y tamizado del material. Las técnicas de trituración son variadas; recientemente Fan et al., 2022, evaluaron el uso de agregados finos de RC obtenidos en dos escenarios (1) a través de una trituradora de mandíbula y un posterior tamizado y, (2) trituración del concreto sucesiva en varias etapas; trituradora de mandíbulas en dos ciclos y para terminar con una criba de doble cubierta; obteniendo agregados aptos para su reutilización en la fabricación de nuevos concretos hidráulicos. Si bien, recientemente, se han estudiado los agregados finos, los agregados gruesos tienen un mayor potencial de aprovechamiento, debido a la relativa simplicidad con la que se pueden obtener a partir de un tratamiento (Ulsen et al., 2021).

Se han producido concretos fabricados con agregados obtenidos a partir de un acondicionamiento de RCD con hasta un 30% más de resistencia que los fabricados con agregados convencionales (Chica & Beltrán, 2018).

También se han estudiado las propiedades de prefabricados elaborados a partir de RCD reciclados. Enciso, 2020 encontró que estos prefabricados presentan resultados similares a los convencionales, e incluso algunas propiedades, como la resistencia al fuego y el aislamiento térmico y acústico, pueden mejorarse con el uso de RCD. No obstante, la alta absorción de los productos finales, atribuida a la porosidad de los agregados, podría ser un inconveniente en condiciones de climas extremos con hielo y deshielo. Es importante recalcar que existen en Colombia normas técnicas de rendimiento que dictan los estándares para los agregados reciclados y para su uso en la fabricación de nuevo concreto: la NTC 6421 y la NTC 6422 (AMVA, 2020).

Es a su vez importante destacar que las empresas y los grandes proyectos de ingeniería, además de enfocarse en alcanzar objetivos de viabilidad y factibilidad económica, también establecen metas ambientales orientadas a la sostenibilidad. Esto responde a los desafíos globales asociados al desarrollo sostenible, que exigen un equilibrio entre el progreso económico y la responsabilidad ambiental. Dentro de este ámbito, se hace necesario cuantificar información que refleje el impacto ambiental (y social) que está asociado a las actividades de una empresa o proyecto. Para alcanzar esto, se requieren indicadores ambientales; se proponen entre ellos las

---

emisiones de carbono, agotamiento de metales, ocupación de tierras, eutrofización del agua dulce, riesgo para la salud humana y emisión de ruido (Yuan et al., 2024). Entre estos, las emisiones de carbono se usan frecuentemente.

No obstante, hasta el momento no se cuentan con métodos estandarizados de medición para las emisiones de carbono asociadas al manejo de los RCD, esto, combinado con variaciones regionales en los factores de emisión, dificultan la toma de decisiones y las estrategias direccionadas a la reducción de emisiones de GEI (Wang et al., 2018). En pro de resolver este problema práctico, investigadores han desarrollado enfoques de contabilidad de emisiones; Wang et al., 2018 establecieron un marco para comparar las reducciones de emisiones de carbono asociadas al reciclaje de RCD en un caso de estudio particular; por su parte, Peng et al., 2021 utilizaron un enfoque de coeficiente de carbono para estimar el potencial de reducción de emisiones al reciclar ciertos RCD con el objetivo de disminuir la extracción de materiales vírgenes.

Dentro de los estudios realizados sobre este tema, los investigadores han descubierto que los factores de emisiones de carbono asociados al consumo de recursos son altamente dependientes de la región; el agua, la gasolina, el diesel y la electricidad son recursos a los que se les han definido estos valores respecto a su región e incluso país; Yung et al., 2024 resumió factores de emisiones de carbono de ellos para países como Japón, Estados Unidos, Reino Unido, Australia, India y Brasil. Estos factores de emisión se utilizan para medir las emisiones de carbono ligadas a los procesos en los que se involucra maquinaria.

Para concluir, se requiere destacar que, una actividad como el reciclaje de RCD pétreos involucra varios procesos en los que se requieren cantidades significativas de recursos, lo que trae consigo una cantidad considerable de emisiones de GEI; por lo que se hace menos beneficioso ambientalmente el reciclaje de los RCD pétreos que su reúso, definiendo reúso como la utilización de componentes o materiales de desecho sin cambiar su forma original (Yung et al., 2024). Lo anterior recalca la importancia de evaluar las condiciones existentes de cada proyecto, para poder determinar las actividades con mayor beneficio ambiental.

---

## **4. Metodología**

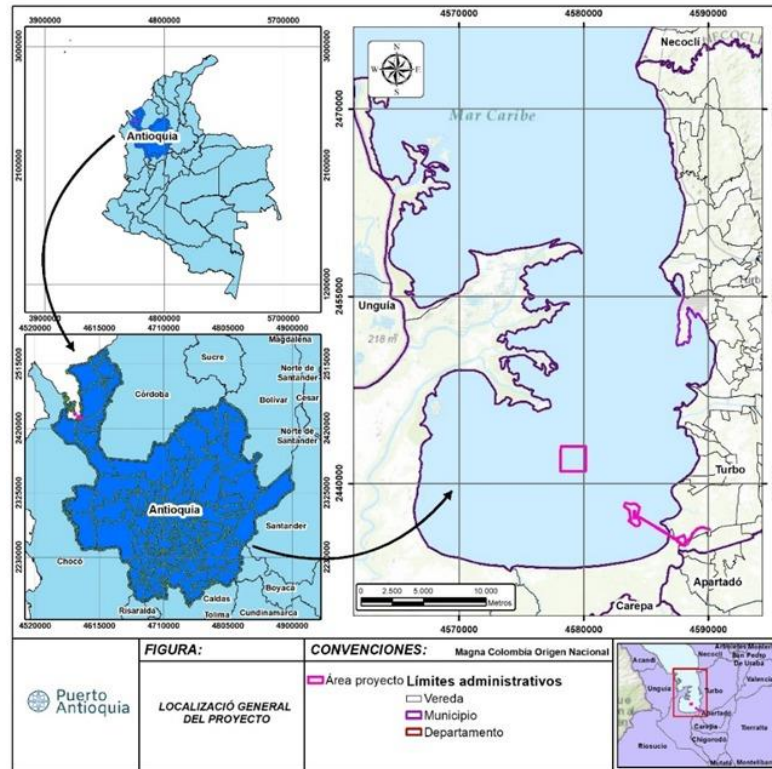
### **4.1. Generalidades del proyecto**

A través de la licencia ambiental emitida por la Autoridad Ambiental de Licencias Ambientales (ANLA) en 2012, a través de la Resolución 0032 de ese mismo año, se indicaba que la terminal portuaria solo sería para la gestión de carga de graneles sólidos y líquidos no hidrocarburos; pero en 2016 se hizo una modificación a la licencia, a través de la Resolución 0078 de ese mismo año, para que fuera una terminal portuaria multipropósito. A continuación, se describe el área de estudio y, se da un contexto de los sociedades, empresas y consorcios del proyecto en su etapa constructiva, y así mismo de las partes interesadas (bancos e inversores).

- **Descripción del área de estudio y del proyecto**

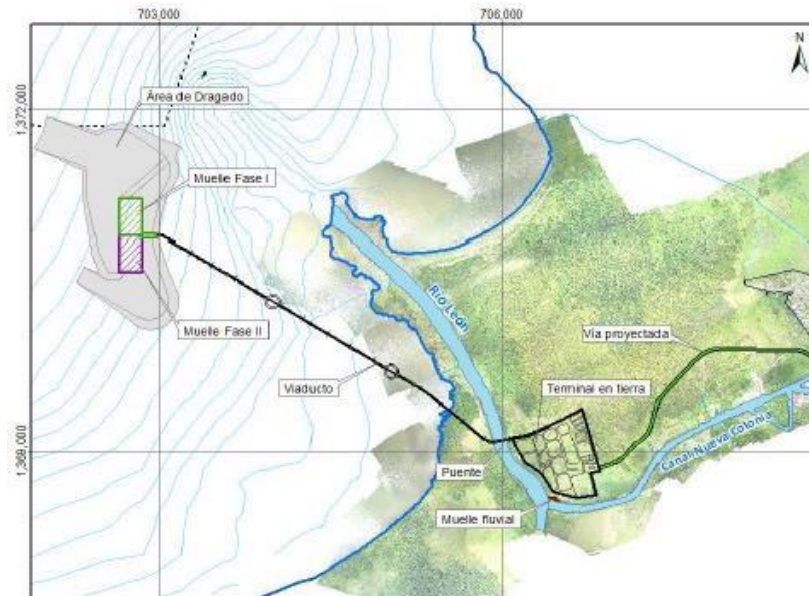
Puerto Antioquia es una terminal portuaria multipropósito ubicada en el costado sur oriental del Golfo de Urabá, en jurisdicción del municipio de Turbo, Antioquia, Colombia, el cual se encuentra en etapa constructiva. En la fase operativa, el puerto gestionará carga general, vehículos, contenedores refrigerados y secos y, graneles sólidos y líquidos no hidrocarburos (Puerto Antioquia, s/f). El área de influencia del proyecto colinda por el norte con la Bahía Colombia (Golfo de Urabá), al sur con el Canal Nueva Colonia, con el municipio de Apartadó y Carepa, al oriente con los corregimientos de Turbo Nueva Colonia y Riogrande y, al occidente se encuentra el Río León y el límite fronterizo con Panamá (Aqua & Terra Consultores Asociados, 2015).

**Figura 2.** Ubicación del proyecto en el departamento de Antioquia



Puerto Antioquia Colombia de Urabá, 2024.

**Figura 3.** Proyecto Puerto Antioquia (detalle)



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2015.

**Figura 4.** *Plataforma onshore de la etapa constructiva de Puerto Antioquia*



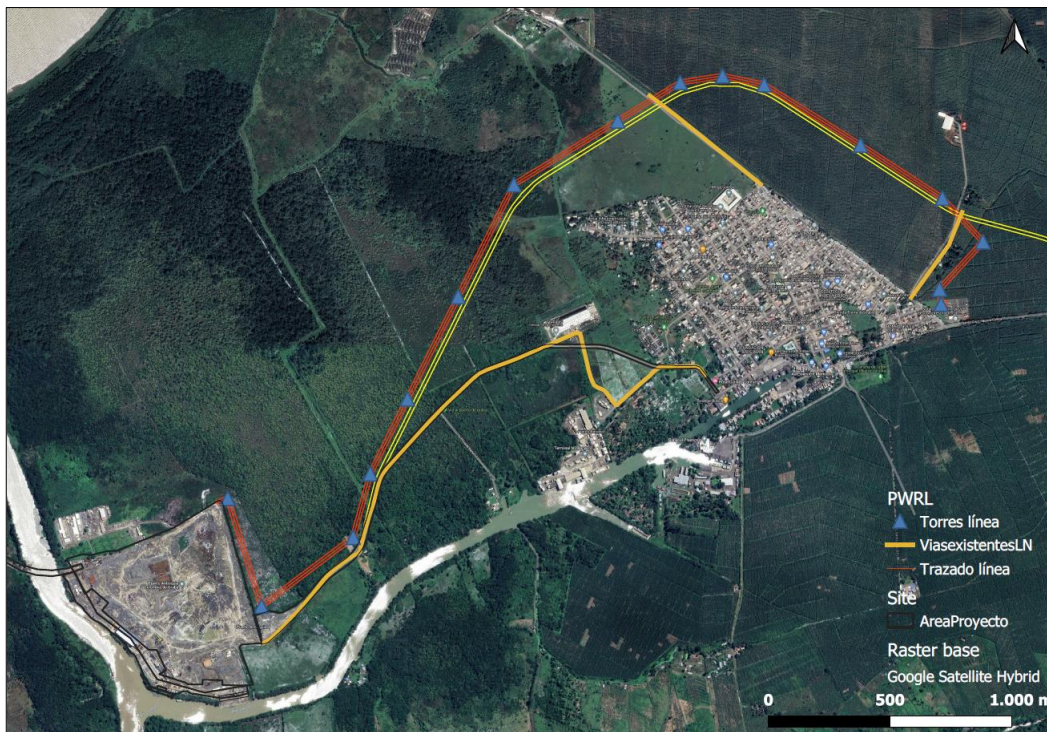
Tomado de Puerto Bahía Colombia de Urabá, 2024.

- **Organigrama del proyecto**

La sociedad administrativa encargada de desarrollar la construcción, operación, y mantenimiento de este, el primer puerto multipropósito del departamento es Puerto Bahía Colombia de Urabá (PBCU). PBCU adquirió los servicios de tres consorcios contratistas para la fase de construcción: (1) el Consorcio Terminal Marítimo Antioquia (COTEMA), encargado de las obras civiles en tierra y fuera de la costa (plataforma offshore); (2) el consorcio MIIT, el cual se designó para la construcción de las instalaciones de silos para graneles y; (3) la empresa Eléctricas de Medellín - EDEMSA, delegado para la construcción de la línea eléctrica que llevará energía desde el subestación de energía de EPM del corregimiento Nueva Colonia hasta la subestación eléctrica de la terminal en tierra del puerto.



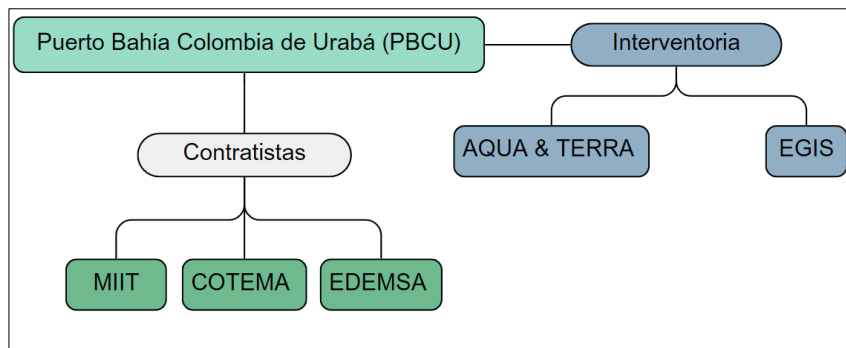
**Figura 5.** *Plataforma onshore de Puerto Antioquia, línea eléctrica y corregimiento Nueva Colonia*



Tomado de Puerto Bahía Colombia de Urabá, 2024.

De igual manera, PBCU contrató los servicios de Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S y del Grupo EGIS para que formaran la interventoría del proyecto. Adicionalmente, y por motivos de que el estudiante fue colaborador de la interventoría (con Aqua & Terra Consultores Asociados), en donde se desempeñó en el cargo de inspector ambiental, es pertinente especificar que esta se divide en 5 dependencias: (1) el equipo ambiental y social (Equipo E&S); (2) equipo civil *onshore*; (3) equipo civil *offshore*; (4) control de documentos y; (5) el equipo de salud y seguridad en el trabajo (Equipo H&S) (ver **Tabla 2**).

**Figura 6.** Organigrama del proyecto



Elaboración propia, 2024.

**Tabla 2.** Equipos de la interventoría

Equipo	Abreviación
Ambiental y Social*	E&S
Civil onshore	Onshore
Civil offshore	Offshore
Salud y Seguridad en el trabajo	H&S
Control de documentos	-

Elaboración propia, 2024.

Nota: \*El practicante es colaborador de este equipo.

El 60% del costo lo componen créditos con entidades públicas y privadas y el 40% restante es asumido por los 10 socios del proyecto (Banafрут, Uniban, entre otros) (Jiménez, 2024). El IDB es la principal organización financiera que respalda el proyecto; este a su vez contrata los servicios de RINA, una multinacional italiana que se encarga de la consultoría ambiental a nivel internacional. Para la fase de construcción, los contratistas deben presentar a RINA, el informe trimestral de cumplimiento ambiental, que tiene que ser revisado previamente por equipo E&S de la interventoría y PBCU.

La interventoría también debe realizar informes mensuales de seguimiento a los contratistas, los cuales son presentados a PBCU, a la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), ANLA y, a CORPOURABÁ; estos a su vez son de interés para RINA y para los inversionistas del proyecto. Finalmente, también es responsabilidad de la interventoría, la revisión de los ICA, que son realizados por PBCU y los contratistas (ver *Tabla 3*).

**Tabla 3.** Informes que debe revisar y/o redactar la interventoría

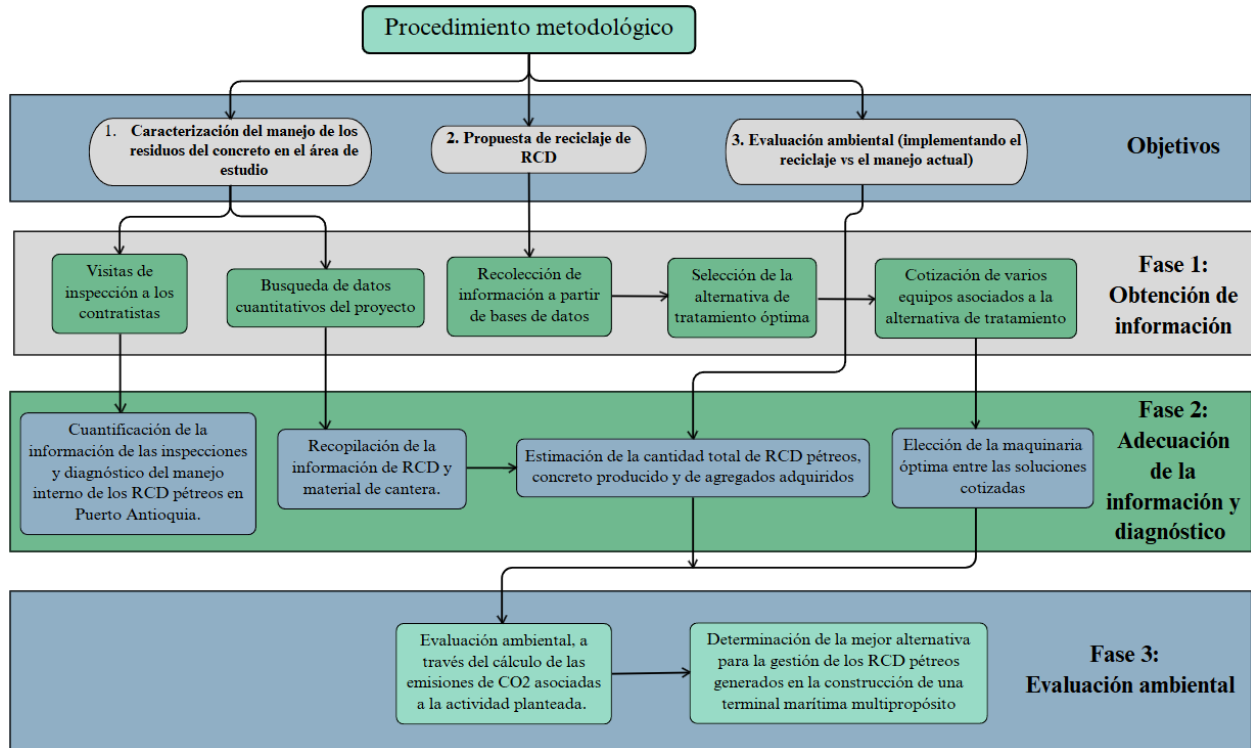
Informe	Periodicidad	Emitido por	Equipo de la interventoría responsable	Función de la interventoría	Destinatario u organización interesada
Informe de Cumplimiento de la Interventoría	Mensual	Interventoría	Todos los equipos	Redactar	PBCU / CORPOURABÁ / ANLA / RINA / IDB / ANI
Informe de Cumplimiento de los Contratistas	Mensual	Cada contratista emite su informe	Todos los equipos	Revisar	PBCU / CORPOURABÁ / ANLA / RINA / IDB / ANI
Informe de Cumplimiento y Desempeño Ambiental y Social	Trimestral	COTEMA / MIIT / EDEMSA / PBCU	E&S y H&S	Revisar y redactar	RINA / IDB
Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA)	Semestral	COTEMA / MIIT / EDEMSA / PBCU	Todos los equipos	Revisar	PBCU / CORPOURABÁ / ANLA / RINA / IDB

Elaboración propia, 2024.

#### 4.2. Procedimiento metodológico

El procedimiento para llegar a los resultados esperados constó de tres etapas estructuradas estratégicamente, enfocadas a que se llegara a los objetivos planteados y a los resultados esperados.

**Figura 7.** Esquema del procedimiento metodológico



Elaboración propia, 2024.

Nota: ver *Anexos/1*.

El detalle de las acciones requeridas en cada fase de la metodología se presenta a continuación.

#### 4.2.1. Fase 1: Obtención de información

Se recolectó información sobre: (1) el manejo que se le dio a los RCD pétreos en la fase constructiva de la obra, (2) el aprovechamiento de los RCD que se ha llevado a cabo mundialmente, búsqueda que se realizó en bases de datos. Por último, los costos asociados a las alternativas de tratamiento (cotizaciones de maquinaria) fueron requeridos.

- **Funciones del cargo: inspector ambiental**




A lo largo del periodo de prácticas, el equipo E&S de la interventoría llevó a cabo visitas de inspección a los contratistas; alrededor de 3 o 4 visitas se realizaron semanalmente, las cuales fueron planificadas estratégicamente para que se examinara el 100% (o un porcentaje cercano) del área de la plataforma *onshore* del proyecto. Se debía prestar atención a temas ambientales como el




---




manejo de aguas lluvia, residuos sólidos peligrosos, no peligrosos y especiales, combustibles, aceites y lubricantes, materiales de construcción, unidades sanitarias portátiles, entre otras. También se tenía que llevar registro fotográfico.

A partir de estas visitas se recopiló información cualitativa sobre el manejo de los RCD en la obra. Para ello se debían identificar los sitios de la zona de estudio donde estaban ubicados los acopios de estos materiales constructivos con potencial reúso. A continuación, se exponen las características y la ubicación de los acopios.

**Tabla 4.** Acopios de RC en la plataforma onshore del proyecto Puerto Antioquia

Punto de Acopio	Fotografía y coordenadas		Descripción
Acopio 1 (A1) Planta de concretos	Latitud:	7° 55' 14.61" N	Este acopio estaba ubicado en la planta de concretos. Allí se depositaba el sedimento de las piscinas donde se lavan las mezcladoras de concreto. Era un acopio exclusivo de RCD pétreos.
		7.920725	
	Longitud:	76° 44' 11.61" W	
		-76.736558	
			
Acopio 2 (A2) “Área de prefabricados”	Latitud:	7° 55' 14.22" N	Acopio ubicado aledaño a la planta de prefabricados. Allí llegaban los RCD pétreos de esta sección de la obra y de otros frentes de obra de la plataforma onshore (ver <b>Figura 8</b> ). Era un espacio amplio, donde llegaban gran cantidad de RC mezclados con lonas de plástico. Era un acopio mixto (compartimentos vecinos para madera y chatarra).
		7.920616	
	Longitud:	76° 44' 18.41" W	
		-76.738447	
			
Acopio 3 (A3) “Área de pretensado”	Latitud:	7° 55' 18.33" N	Espacio que se encontraba en el área de pretensado, donde se le realizaba un proceso de curado rápido al concreto. Se acopiaban allí residuos de concreto que se generaban en este espacio. Era un acopio exclusivo de RCD pétreos.
		7.921758	
	Longitud:	76° 44' 21.41" W	
		-76.739280	
			
Acopio 4 (A4) “Mejor esquina”	Latitud:	7° 55' 33.60" N	Para llegar a este acopio había que tomar una lancha pues estaba ubicado en la porción de tierra de la otra ribera del río, llamada la
		7.926000	
	Longitud:	76° 44' 42.97" W	
		-76.745270	

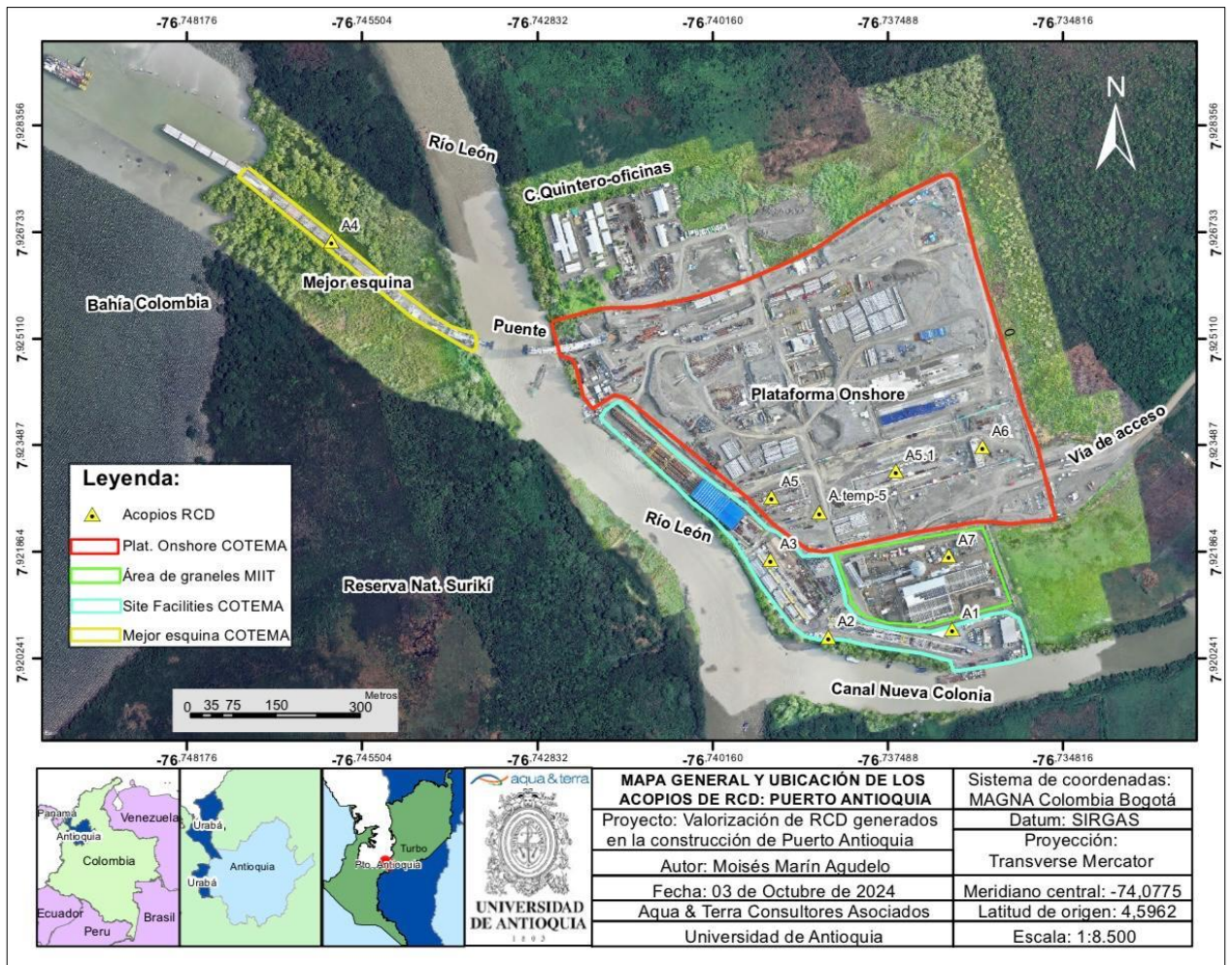
		<p>Mejor Esquina, donde se construyó parte del viaducto que conecta la plataforma <i>onshore</i> con la <i>offshore</i> (Ver <b>Figura 8</b>). La posición de este acopio era variable, pues las actividades constructivas del viaducto cambiaban de posición, y con ellas el acopio, con el fin de que fuera más eficiente trasladar los residuos generados por los derrames de concreto. Cada semana, los residuos generados en la Mejor Esquina eran trasladados a la parte principal de la plataforma <i>onshore</i>. Era un acopio exclusivo de RCD pétreos.</p>								
<p>Acopio 5 (A5) “Edificio 712” Bodega de consolidación – desconsolidación # 1</p>	<table border="1"> <tr> <td>Latitud:</td> <td>7° 55' 21.82" N</td> </tr> <tr> <td></td> <td>7.922736</td> </tr> <tr> <td>Longitud:</td> <td>76° 44' 21.33" W</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-76.739258</td> </tr> </table> 	Latitud:	7° 55' 21.82" N		7.922736	Longitud:	76° 44' 21.33" W		-76.739258	<p>Se llevaban allí los residuos generados de la construcción del almacén de consolidación y desconsolidación de carga de granel (en etapa constructiva se le conoce como “Edificio 712”). Es un acopio que funcionaba solo para la construcción de esta estructura, y era un acopio mixto.</p>
Latitud:	7° 55' 21.82" N									
	7.922736									
Longitud:	76° 44' 21.33" W									
	-76.739258									
<p>Acopio 6 (A6) “Edificio 708”</p>	<table border="1"> <tr> <td>Latitud:</td> <td>7° 55' 21.82" N</td> </tr> <tr> <td></td> <td>7.922737</td> </tr> <tr> <td>Longitud:</td> <td>76° 44' 21.33" W</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-76.739259</td> </tr> </table> 	Latitud:	7° 55' 21.82" N		7.922737	Longitud:	76° 44' 21.33" W		-76.739259	<p>Los residuos generados de la construcción de tres edificios eran almacenados allí. Era un acopio que funcionaba solo para la construcción de estas estructuras. Al inicio del periodo de prácticas era un acopio mixto, luego pasó a ser solo de RCD pétreos.</p>
Latitud:	7° 55' 21.82" N									
	7.922737									
Longitud:	76° 44' 21.33" W									
	-76.739259									
<p>Acopio 7 (A7) Área del contratista MIIT</p>	<table border="1"> <tr> <td>Latitud:</td> <td>7° 55' 21.82" N</td> </tr> <tr> <td></td> <td>7.922738</td> </tr> <tr> <td>Longitud:</td> <td>76° 44' 21.33" W</td> </tr> </table>	Latitud:	7° 55' 21.82" N		7.922738	Longitud:	76° 44' 21.33" W	<p>Era el acopio de RCD del área del contratista MIIT, encargados de la</p>		
Latitud:	7° 55' 21.82" N									
	7.922738									
Longitud:	76° 44' 21.33" W									

	<p>-76.739260</p> 	<p>construcción de los silos y bodegas de graneles sólidos y líquidos. Allí eran almacenados temporalmente RCD pétreos junto con productos de excavación, y aledaño a estos estaban la chatarra y la madera.</p>
<p>Acopio 5.1 (A5.1) Bodega de consolidación – desconsolidación # 2</p>		<p>A mediados de septiembre de 2024 se comenzaron las obras de construcción de la bodega de consolidación y desconsolidación de carga a granel #2. Los RCD generados en dicho frente de trabajo se almacenaron temporalmente en este acopio, que funcionó hasta noviembre de ese mismo año.</p>
<p>Acopio temporal 5 (A. temp-5)</p>		<p>Acopio temporal ubicado en un sector aledaño al Edificio 712. Este punto de almacenamiento se utilizó exclusivamente para RCD pétreos desde inicios de octubre de 2024 hasta la última semana de octubre del mismo año.</p>

Elaboración propia, 2024.



**Figura 8.** Ubicación de los acopios de RCD y frentes de trabajo en la plataforma onshore de Puerto Antioquia.



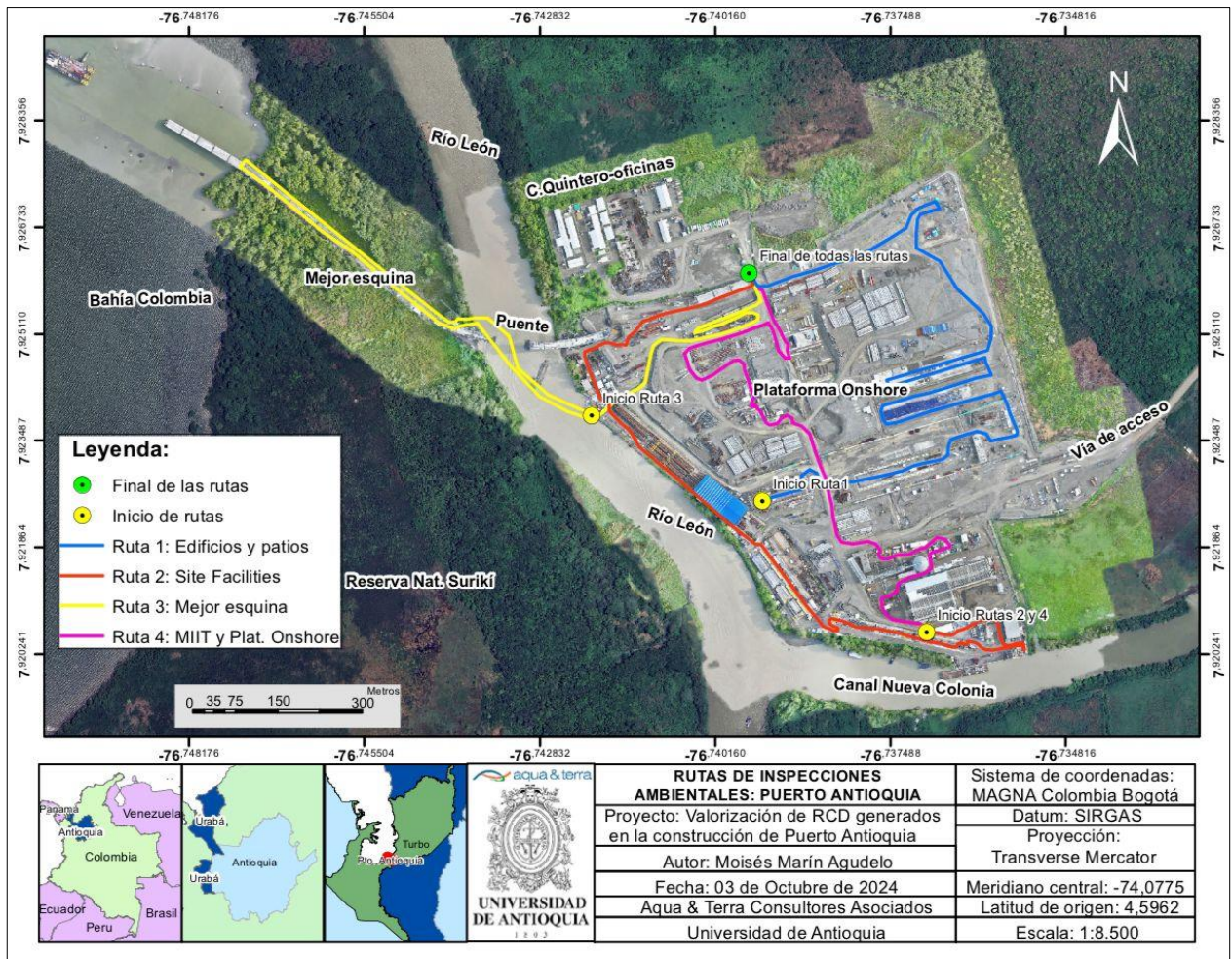
Elaboración propia, 2024.

Nota: ver *Anexos 6/I*.

En el trabajo de campo inherente a las funciones, también se observaron las actividades realizadas que generaban RC, y si se llevaba a cabo la recolección de estos.

Se definieron rutas estándares para aumentar la eficiencia en los recorridos, teniendo en cuenta el esfuerzo físico requerido y los lugares estratégicos que se necesitaban visitar cada semana (frentes de obra activos). A continuación, se muestran las rutas que se realizaron cada semana, una ruta cada día; el día de la semana en que se realizaba una u otra ruta era definido al azar.

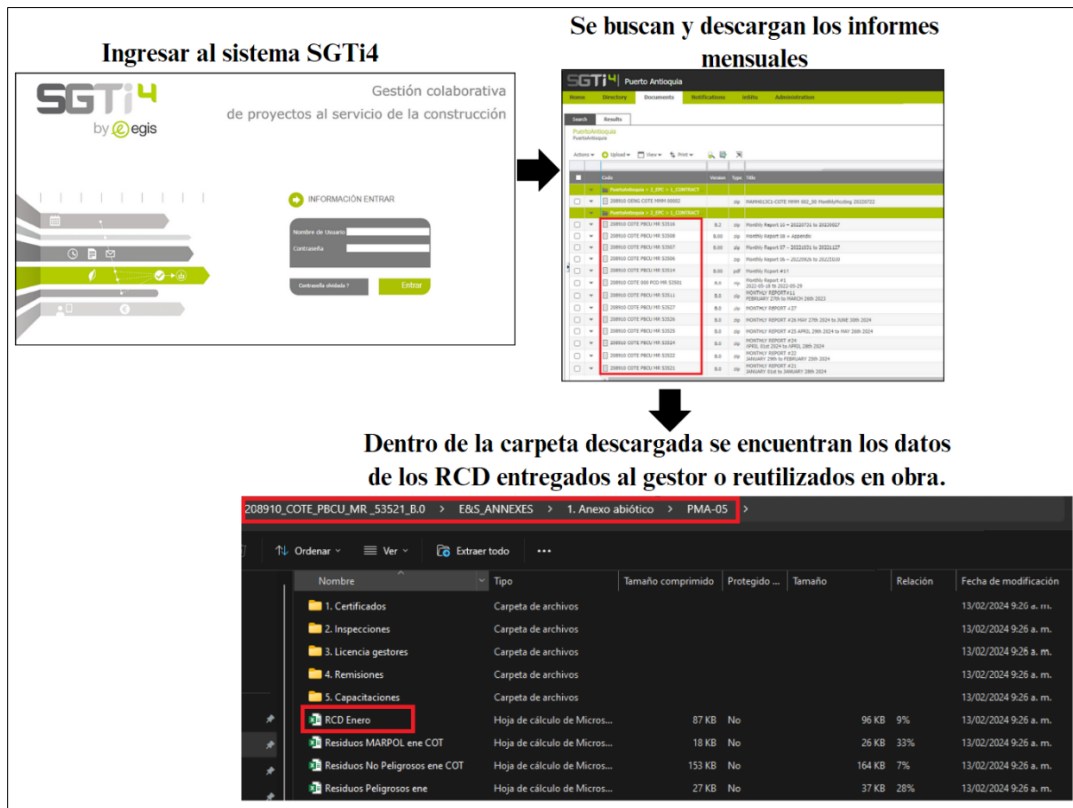
**Figura 9.** Rutas de inspecciones ambientales en la plataforma onshore de Puerto Antioquia



Elaboración propia, 2024.  
Nota: ver *Anexos 6/1*.

El inspector ambiental debió hacer parte de la gestión documental de la interventoría; se tenía la función de alimentar la base de datos empresarial (sistema SGTi4) y revisar/redactar los informes especificados en la **Tabla 3**. La generación de RCD, de producción de concreto in-situ y de la cantidad de agregados que se adquirieron fue reportada dentro de estos documentos.

**Figura 10.** Proceso de recolección de datos cuantitativos de generación de RCD, de los Informes Mensuales de Cumplimiento de los Contratistas



Elaboración propia, 2024.

**Figura 11.** Proceso de recolección de datos cuantitativos de generación de RCD, de los ICA



Elaboración propia, 2024.

- **Recolección de información (estado del arte) a partir de bases de datos y selección de alternativa de tratamiento para los RCD pétreos**

La información recolectada acerca de los RCD se extrajo de bases de datos como Science Direct, MDPI y PubMed, también de documentos de la U.S EPA y, de guías nacionales sobre la gestión de este tipo de residuos. Datos acerca de la generación, tasas de reutilización, métodos de

---

tratamiento y, productos obtenidos para un segundo uso del material, fueron las bases para determinar el tipo de manejo alternativo que se le podría dar a los RCD pétreos producidos en la plataforma *onshore* en la etapa constructiva de Puerto Antioquia. La búsqueda de este tipo de información fue una actividad que, si bien se realizó de manera rigurosa en las primeras semanas de las prácticas, continuó a lo largo de los seis meses, con el objetivo de complementar conceptos.

- **Cotización de alternativas de tratamiento de los RCD generados en el área de estudio**

Se contactó a múltiples gestores de RCD nacionales y compañías internacionales de maquinaria pesada con el objetivo de cotizar los equipos necesarios para llevar a cabo el aprovechamiento propuesto para los RCD pétreos generados en el proyecto.

#### **4.2.2. Fase 2: Manejo y consolidación de la información, y diagnóstico del manejo interno actual de los RCD pétreos**

- **Cuantificación de la información cualitativa recolectada en las visitas de inspección**

A partir de datos cualitativos obtenidos en las visitas de inspección, se procedió a cuantificar la información. Con el fin de obtener resultados numéricos se estableció un índice para calificar el manejo interno de los RCD pétreos en la construcción de esta obra de infraestructura en específico. Este es un valor adimensional que oscila entre 0 y 100, el cual representa una herramienta para la simple interpretación del estado del manejo integral de los RCD pétreos en este caso de estudio.

Se realizaron visitas de inspección previas a la formulación del índice, para obtener un contexto del manejo ambiental general en la plataforma *onshore*, y así poder tener una idea más clara de que tipo de aspectos se podían evaluar en relación con los RCD pétreos.

A su vez se revisó la normativa nacional e internacional, y los PMA de Puerto Antioquia, con el fin de definir cuáles serían los criterios para calificar. Los documentos normativos revisados fueron: (1) la Resolución 0078 de 2016 (Licencia Ambiental del proyecto); (2 y 3) la Resolución 0472 de 2017 y la Resolución 1257 de 2021, del MADS; (4) el *Standards for Managing Construction Waste in NSW* (New South Wales), de la EPA Australiana y; (5) el *Construction and Demolition Debris Management in the United States*, de la U.S EPA.

La formulación del índice específico para los RCD pétreos de Puerto Antioquia se describe a continuación.

**1er paso:** Para iniciar con la estructuración de este mecanismo de cuantificación de información se determinó lo que se iba a evaluar; en la siguiente tabla se presentan los criterios.

**Tabla 5.** *Criterios utilizados para calificar los acopios de RC en la zona de estudio.*

<b>Definición de criterios, según Resolución 0472 de 2017 (modificada por la Resolución 1257 de 2021) y normativa internacional.</b>	
1. Segregación de residuos.	Se revisa si los residuos están adecuadamente segregados según su tipo (metales, plásticos, escombros, etc.).
2. Señalización	Se revisa si los acopios tienen señalización legible y claramente visible.
3. Drenaje y control de sedimentos.	Se revisa si los acopios cuentan con sistema de drenaje para el control de lixiviados e, infraestructura para el manejo de sedimentos.
4. Dispersión de partículas.	Se evalúa si se toman medidas para evitar la dispersión de material particulado.
5. Mantenimiento y limpieza	Se evalúa si se toman medidas para evitar la acumulación indeseada de residuos de concreto.

Elaboración propia, 2024.

**2do paso:** Se asignó un puntaje de calificación para cuantificar el grado de cumplimiento de los acopios de RCD en la plataforma *onshore*, como se muestra a continuación.

**Tabla 6.** *Puntaje de calificación.*

<b>Puntaje de calificación.</b>	
1	Deficiente
2	Insuficiente
3	Aceptable
4	Sobresaliente
5	Excelente

Elaboración propia, 2024.

**3er paso:** Estos valores debían tener asociado un sustento cualitativo que los relacionara con lo observado en las visitas de inspección. A cada criterio se le asoció una descripción de lo que equivaldrían esos valores del 1 al 5; esto se presenta en siguiente tabla.

**Tabla 7. Criterios de asignación del puntaje.**

<b>Criterios para asignar el puntaje</b>		
<b>1. Segregación de residuos</b>	1	Residuos completamente mezclados.
	2	RCD pétreos acopiados junto con otro tipo de RCD aprovechables diferentes a RCD de excavación, como plástico, madera y/o chatarra.
	3	Se acopian RCD pétreos junto con RCD de excavación (también aprovechable).
	4	Se acopia RC junto con otros tipos de RCD pétreos.
	5	Solo se acopia RC.
<b>2. Señalización</b>	1	No hay señalización visible o disponible en el sitio.
	2	Señalización errada, borrosa y/o desgastada y, visibilidad pobre (tamaño y ubicación).
	3	Señalización clara y legible, pero visibilidad pobre; o viceversa.
	4	Las señales son claras y visibles.
	5	La señalización es clara, altamente visible, y está estratégicamente ubicada.
<b>3. Drenaje y control de sedimentos (sistema de drenaje de aguas lluvias y capa impermeable)</b>	1	Sin estructuras de drenaje de aguas lluvias ni capa impermeable.
	2	Se tiene una de las dos estructuras, con oportunidad de mejoras técnicas.
	3	Se tiene una de las dos estructuras en buenas condiciones, pero sin la otra.
	4	Cuenta con una superficie impermeable y con estructuras de drenaje para el agua lluvia, pero ambas con oportunidad de mejoras técnicas.
	5	Cuenta con una superficie impermeabilizada y con estructuras de drenaje para el agua lluvia, ambas en buen estado.
<b>4. Dispersión de partículas</b>	1	Sin medidas de mitigación; acopio expuesto en todas direcciones.
	2	Medidas de mitigación insuficientes; sin cerramiento superior o lona de protección y cerramientos laterales no acordes con el volumen de RCD acopiados.
	3	Control de impactos intermedio; hay cerramientos laterales de una altura apropiada para el volumen de RC que llegan al acopio, pero sin cerramiento superior.
	4	Apropiado control de impactos; hay cerramientos laterales de una altura apropiada para el volumen de RC que llegan al acopio y se procura cubrirlos con una lona en la parte superior.
	5	Excelente control de impactos; hay cerramientos (1) superior estructural (techo) y (2) laterales de una altura apropiada para el volumen de RC que llegan al acopio.

<b>5. Mantenimiento y limpieza*</b>	1	Frecuencia de recolección > 1 mes: En el acopio se encuentran los mismos materiales acumulados hace un mes o más.
	2	Frecuencia de recolección entre 15 días - 1 mes: En el acopio se encuentran los mismos materiales acumulados hace dos semanas, o incluso se observa un volumen mayor.
	3	Frecuencia de recolección entre 7 a 15 días: En el acopio se encuentran los mismos materiales acumulados la semana pasada, o incluso se observa un volumen mayor.
	4	Frecuencia de recolección: Se encuentra el acopio sin el material observado la semana pasada.
	5	Frecuencia de recolección y limpieza semanal: Se encuentra el acopio sin el material observado la semana pasada y, adicionalmente las condiciones estructurales y de aseo del lugar son adecuadas.

Elaboración propia, 2024.

Nota: Para definir la frecuencia de recolección se apoyó en las fotos tomadas en cada inspección, comparando lo observado cada semana con lo que se vio para el mismo acopio en la semana inmediatamente anterior (ver *Anexos/7*).

**4to paso:** Se determinó el valor adimensional correspondiente, el cual tiene un rango general desde 0 al 100. Así se pudo establecer rangos de cumplimiento y calificar globalmente el manejo interno de los RCD pétreos del proyecto.

**Tabla 8.** Rangos de calificación para el manejo ambiental

Calificación global del manejo ambiental de los RCD pétreos	
0 - 19	Deficiente manejo ambiental
20 - 39	Insuficiente manejo ambiental
40 - 59	Aceptable manejo ambiental
60 - 79	Sobresaliente manejo ambiental
80 - 100	Excelente manejo ambiental

Elaboración propia, 2024.

- **Evaluación de los RCD pétreos de acuerdo con el índice**

Cada semana, a partir del momento de la formulación del índice (primera semana de agosto), y hasta la tercera semana de noviembre, se evaluaron: (1) los acopios, (2) cada criterio por separado y, (3) los acopios para cada uno de los criterios. Todas las semanas se tuvo una calificación (del 0 al 25) para cada uno de los acopios evaluados; y de los 5 criterios (del 0 al múltiplo del 5 asociado al número de acopios calificados esa semana; por ejemplo, se calificaron 4 acopios en una semana, pues el puntaje máximo que se tiene en cuenta para calificar sería  $4 \times 5 = 20$ ), las cuales se transformaron a porcentajes de la siguiente manera.

Cada semana se calificaron así todos los acopios:

**Ecuación 1.** Calificación semanal para cada acopio.

$$I. sem\_RCD Ac. = \frac{\sum_{i=1}^n (Puntaje\ criterio_i)}{25} * 100$$

Elaboración propia, 2024.

Nota 1: n (número de criterios evaluados) es igual a 5 todas las semanas.

Nota 2: Se aplica esta fórmula para cada acopio.

Cada semana se califican así todos los criterio:

**Ecuación 2.** Calificación semanal para cada criterio.

$$I. sem RCD item = \frac{\sum_{i=1}^n (Puntaje\ Acopio_i)}{n * 5} * 100$$

Elaboración propia, 2024.

Nota 1: n (número de acopios) puede variar algunas semanas, debido a que algunos acopios dejaron de funcionar parcial o totalmente en el periodo de evaluación.

Nota 2: Se aplica esta fórmula para cada uno de los 5 criterios

Cada semana efectiva de reporte se diligenció el siguiente formato.

**Figura 12.** Captura de pantalla del formato de calificación semanal.

	1. Segregación de residuos		2. Señalización		3. Drenaje y control de sedimentos		4. Dispersión de partículas		5. Mantenimiento y limpieza		Puntaje general del acopio de RCD		
	Acopio	Calificación	Acopio	Calificación	Acopio	Calificación	Acopio	Calificación	Acopio	Calificación	Acopio	Sumatoria de la calificación del acopio	Puntaje general del acopio
	Acopio 1	4	Acopio 1	2	Acopio 1	5	Acopio 1	3	Acopio 1	5	Acopio 1	19	76,00
	Acopio 2	4	Acopio 2	2	Acopio 2	3	Acopio 2	2	Acopio 2	3	Acopio 2	14	56,00
	Acopio 3	3	Acopio 3	1	Acopio 3	3	Acopio 3	3	Acopio 3	5	Acopio 3	15	60,00
	Acopio 4	4	Acopio 4	3	Acopio 4	1	Acopio 4	1	Acopio 4	3	Acopio 4	12	48,00
	Acopio 5	5	Acopio 5	5	Acopio 5	1	Acopio 5	3	Acopio 5	4	Acopio 5	18	72,00
	Acopio 6	1	Acopio 6	2	Acopio 6	1	Acopio 6	1	Acopio 6	3	Acopio 6	8	32,00
	Acopio 7	3	Acopio 7	1	Acopio 7	1	Acopio 7	3	Acopio 7	3	Acopio 7	11	44,00
Sumatoria del criterio	24		16		15		16		26				
Puntaje general del criterio	Segregación	68,57	Señalización	45,71	Drenaje y control de sedimentos	42,86	Dispersión de partículas	45,71	Mantenimiento	74,29			

Elaboración propia, 2024.

Al final del periodo de reporte (primera semana de agosto – segunda semana de noviembre) se hizo un promedio, del que se obtuvo el puntaje general definitivo para la caracterización, con un sustento cualitativo y cuantificativo, del manejo interno de los RCD pétreos generados en la etapa constructiva de la primera terminal portuaria multipropósito de Antioquia.

Los resultados definitivos del índice se obtuvieron a partir de las siguientes ecuaciones.

**Ecuación 3.** Calificación general para cada acopio.

$$I. RCD Ac. = \frac{\sum_{i=1}^n ((I. sem RCD Ac)_i)}{n} * 100$$

Elaboración propia, 2024.



**Ecuación 4.** *Calificación general para cada criterio.*

$$I. RCD \text{ criterio} = \frac{\sum_{i=1}^n ((I. \text{sem RCD criterio})_i)}{n} * 100$$

Elaboración propia, 2024.

Nota: Tanto para la ecuación 3, como para la ecuación 4, n es el número de semanas en las que se calificó.

Para finalizar, se diagnosticaron los acopios respecto a cada uno de los criterios. Para ello se usó la siguiente matriz.

**Tabla 9.** *Clasificación de los acopios respecto a cada criterio.*

	Segregación de residuos	Señalización	Drenaje y control de sedimentos	Dispersión de partículas	Mantenimiento y limpieza
Acopio 1					
Acopio 2					
Acopio 3					
Acopio 4					
Acopio 5					
Acopio 5.1					
Acopio. Temp 5					
Acopio 6					
Acopio 7					

Elaboración propia, 2024.

Cada una de las celdas se diligenció con el resultado de la siguiente fórmula:

**Ecuación 5.** *Calificación de los acopios para cada criterio.*

$$AcopioX_{criterioR} = \frac{\sum_{i=1}^n ((C)_i)}{(n * 5)} * 100$$

Elaboración propia, 2024.

Nota: C= Clasificación por semana del criterio evaluado por acopio; Y= Número de semanas evaluadas.

- **Estimación de RCD pétreos generados, concreto fabricado y de agregados adquiridos en el proyecto Puerto Antioquia en el periodo de análisis**

Los datos compilados se extrajeron de las fuentes de información del proyecto. La siguiente tabla es el modelo de matriz creado para introducir la información. Vale aclarar que el 10/12/2024 fue la fecha definida como el cierre para la recopilación de datos, por lo que la información de diciembre no fue incluida para los propósitos de este informe.

**Tabla 10.** Matriz de información recopilada de generación de RCD y de demanda de material de cantera

Ene 24 - Nov 24				
Mes	Concreto (m3)	RCD pétreos (TN)	Agregados	
			Concreto (AG25 y AG 19) (m <sup>3</sup> )	Base granular (para pavimentos) (m <sup>3</sup> )
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				

Elaboración propia, 2024.

La tabla se compone de 5 columnas:

- Mes.
- Concreto producido.
- RCD generados.
- Agregados para el concreto (AG25 y AG19).
- Base granular que se usó para sobrecarga del terreno y luego como subbase para la producción del pavimento del puerto.

Con la proyección semestral de RCD pétreos y los datos de concreto producido mensualmente, se realizaron reglas de tres en los casos donde había falta de información mensual de generación de RCD pétreos, una relación que es útil en ausencia de datos o cuando el dato oficial no es 100% confiable (producciones de RCD pétreos demasiado bajas, por ejemplo).

**Ecuación 6.** Generación de RCD mensual en ausencia de un dato oficial confiable.

$$RCD_{mensual} = \frac{Concreto_{mensual} * RCD_{semestral}}{Concreto_{semestral}}$$

Elaboración propia, 2024.

Finalmente, se utilizó un sistema de convenciones que le indica al lector la forma en que se consiguió el dato.

**Tabla 11.** Rangos de calificación para el manejo ambiental

Convenciones	
	El dato se obtiene de documentos oficiales del proyecto
	El dato se debe estimar, debido a su ausencia en documentos oficiales.

Elaboración propia, 2024.

- **Elección de la mejor maquinaria entre las alternativas cotizadas**

De los equipos cotizados, se debió elegir la mejor opción para este caso de estudio, con el objetivo de que los cálculos realizados en la fase 3 del proceso metodológico se realizara solo para un equipo. Para esta ocasión se decidió por una matriz de decisión ponderada, útil en la elección de alternativas similares entre sí.

**1er paso:** Se definieron múltiples criterios que se tienen en cuenta por lo general para la toma de decisiones en proyectos de ingeniería al adquirir maquinaria. A continuación, se listan los criterios definidos para este caso de estudio.

- Costo inicial (capital inicial)
- Rendimiento
- Requerimiento energético.
- Años de experiencia del fabricante y sus certificaciones de calidad.
- Garantía ofrecida
- Mantenimiento (costo, frecuencia, y facilidad de la labor).
- Repuestos (disponibilidad de los repuestos en el lugar y su costo).
- Minimización de impactos ambientales.

**2do paso:** Se le asignó un peso que refleje la importancia relativa de cada criterio en la toma de decisiones.

Con el objetivo de validar estos datos, se acudió a la experiencia de 18 ingenieros de distintas áreas, cada uno con amplio recorrido. Se creó una encuesta para recolectar cuantitativamente la información, dando la instrucción de que se calificara del 1 al 5, siendo 5 el número que entregaba la mayor importancia. Para darle mayor claridad a los encuestados, se asoció una definición a cada número entero de la escala usada.

**Tabla 12.** Descripción relacionada a cada número entero de la escala usada para darle un peso a cada criterio.

1	<b>Muy baja importancia:</b> Este criterio tiene una influencia mínima en la decisión de que equipo adquirir.
2	<b>Baja importancia:</b> Este criterio es relevante, pero su peso en la decisión es bajo y podría ser fácilmente compensado por otros criterios más importantes.
3	<b>Importancia moderada:</b> El criterio es significativo y tiene un impacto notable; sin embargo, no es determinante por sí solo en la elección de qué equipo adquirir.
4	<b>Alta importancia:</b> Este criterio influye considerablemente en la toma de decisiones.
5	<b>Muy alta importancia:</b> Este criterio es crítico y determinante en la elección del equipo, y tenerlo en cuenta para la decisión ayuda a el bienestar del proyecto y el entorno.

Elaboración propia, 2024.

El modelo de tabla utilizado para la encuesta se presenta a continuación.

**Tabla 13.** Encuesta utilizada para la asignación del peso de cada criterio.

Oficina civil Offshore										
Criterio	Ing. Lucas S.		Ing. Stiven		Ing. Carlos H.		Ing. Alexis		Ing. Darwin	
Criterio 1										
Criterio 2										
Criterio 3										
Criterio 4										
Criterio 5										
Criterio 6										
Criterio 7										
Criterio 8										
Otro	¿Cuál?	Peso	¿Cuál?	Peso	¿Cuál?	Peso	¿Cuál?	Peso	¿Cuál?	Peso

Elaboración propia, 2024.

El peso del criterio se sacó con el promedio de todos los datos recopilados. Es importante aclarar que, al ser un promedio, el valor final del peso no puede ser un entero, pues se perdería precisión; se tuvieron en cuenta dos cifras decimales.

**3er paso:** Con los valores de peso asignados a cada criterio, se procedió a calificar cada alternativa en los 8 criterios. Al igual que para la escala de peso de los criterios, también se relacionó una descripción a cada número de la escala utilizada para la calificación -del 1 al 5-.

**Tabla 14.** Descripción relacionada a cada número en la escala de clasificación, por criterio, de cada alternativa.

Calificación de cada alternativa para cada criterio evaluado.	
5	<b>Muy alta conveniencia:</b> Evaluando este criterio, la alternativa es 100% viable, factible y sostenible.
4	<b>Alta conveniencia:</b> La alternativa es adecuada teniendo en cuenta este criterio, sin embargo, no alcanza la viabilidad, factibilidad y/o sostenibilidad completa.
3	<b>Conveniencia moderada:</b> La alternativa es aceptable y ofrece un nivel razonable de adecuación para el criterio, aunque no destaca.
2	<b>Baja conveniencia:</b> La alternativa cumple con lo básico, pero tiene varias limitaciones que podrían impactar negativamente en el proyecto.
1	<b>Muy baja conveniencia:</b> La alternativa es poco adecuada y presenta varios inconvenientes para el proyecto en este criterio.

Elaboración propia, 2024.

Considerando lo anterior, se pudo calificar cada alternativa cotizada. En la siguiente tabla se presenta el modelo de la matriz de decisión ponderada utilizada. Dentro de la matriz, los criterios se organizaron verticalmente, y las alternativas cotizadas se extendieron en la horizontal, creando así un espacio idóneo para la organización de los datos.

**Tabla 15.** Modelo de la matriz de decisión ponderada.

Criterio	Peso asignado del criterio	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Valor o consideración	Calificación	Valor o consideración	Calificación	Valor o consideración	Calificación
Criterio 1							
Criterio 2							
Criterio 3							
Criterio 4							
Criterio 5							
Criterio 6							
Criterio 7							
Criterio 8							
		Suma ponderada		Suma ponderada		Suma ponderada	

Elaboración propia, 2024.

El resultado, por alternativa, fue calculado con la suma ponderada de las evaluaciones de cada uno de los criterios.

**Ecuación 7.** *Calificación de cada alternativa de maquinaria cotizada.*

$$\text{Alternativa } X = \sum_{i=1}^n (\text{peso\_criterio}_i) * (\text{calificación\_criterio}_i)$$

Elaboración propia, 2024.

La ecuación anterior fue aplicada para cada alternativa cotizada; la opción que obtuvo un mayor valor fue seleccionada para la realización de los cálculos de la fase 3 del desarrollo metodológico.

**4.2.3. Fase 3: Evaluación ambiental a través de la contabilidad de emisiones de CO<sub>2</sub>**

Para la fase final de este procedimiento metodológico se realizó una segunda revisión bibliográfica robusta enfocada en el tema de los inventarios de emisiones de una compañía o proyecto, para ello se revisaron textos como el *Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte de Emisiones de GEI* (el cual es ofrecido gratuitamente en la página web del Protocolo GHG), y artículos científicos sobre las emisiones de carbono asociadas al manejo integral de los RCD.

- **Determinación de distancias para los trayectos ligados al transporte**

Se definieron los puntos estratégicos y los trayectos entre ellos. Los datos de las distancias fueron extraídos del servidor Google Maps.

Se pusieron convenciones a cada uno de los trayectos, y se diligenció una tabla como la siguiente.

**Tabla 16.** *Modelo de la tabla de información de los trayectos.*

Trayecto	Nombre
1. Punto de interés 1 – Punto de interés 2	Trayecto 1
2. Punto de interés 2 – Punto de interés 3	Trayecto 2
3. Punto de interés 3 – Punto de interés 4	Trayecto 3
4. Punto de interés 1 – Punto de interés 4	Trayecto 4

Elaboración propia, 2024.

- **Adecuación de los datos para la medición de emisiones**

El primer paso de este apartado consistió en determinar el consumo de combustible de los equipos mecánicos involucrados en los procesos de transporte y trituración de los RCD pétreos y

del material de cantera. Para simplificar el inventario de emisiones se trabajó con dos equipos: el vehículo estándar para el transporte de material que se utilizó en Puerto Antioquia, y la planta de trituración cotizada y elegida en la fase anterior de este caso de estudio.

- **Vehículo estándar para el transporte de material:** Para estimar el consumo de combustible de esta unidad se realizó una encuesta a los conductores de los vehículos responsables del transporte de materiales pétreos en el sitio donde se realizaba la recarga de combustible dentro del proyecto. Se les consultó el kilometraje de su vehículo, cuantos viajes ida y vuelta desde el Proyecto hasta la cantera (trayecto de referencia para el cálculo) podían realizar entre recargas, y algunos datos adicionales. Se encuestó a tres conductores, para incrementar la validez estadística de los datos. Con la información recolectada se llenó el siguiente formato. Vale recalcar que el combustible usado es ACPM, o petrodiesel.

**Tabla 17.** Procedimiento para el consumo de combustible del vehículo de transporte.

Distancia recorrida entre la cantera Agregados Mutatá y el Proyecto			
	Vehículo 1 (km)	Vehículo 2 (km)	Vehículo 3 (km)
Kilometraje recarga actual	D1 <sub>1</sub>	D1 <sub>2</sub>	D1 <sub>3</sub>
Kilometraje recarga pasada	D2 <sub>1</sub>	D2 <sub>2</sub>	D2 <sub>3</sub>
Distancia recorrida entre recargas	D1 <sub>1</sub> – D2 <sub>1</sub>	D1 <sub>2</sub> – D2 <sub>2</sub>	D1 <sub>3</sub> – D2 <sub>3</sub>
Promedio de las distancias recorridas entre recargas de los tres vehículos (km)	$P.d = \frac{\sum_1^3 D1_i - D2_i}{3}$		
Número de viajes que se realizan entre recargas de combustible	$\#V = \frac{P}{\text{Distancia trayecto 1}}$		
Volumen del tanque de combustible (gal)	V		
Cantidad de combustible para el cálculo	V <sub>u</sub>		
Consumo de combustible Fuentes móviles (L/km)	$C_{FM} = \frac{Vu * 3,785}{P.d}$		

Elaboración propia, 2024.

- **Planta de trituración cotizada y elegida:** No se requirieron cálculos para determinar el consumo de combustible asociado al funcionamiento de esta fuente de emisiones. En el marco de la cotización de la maquinaria se entabló una conversación con el agente de ventas de la unidad en la que se le consultó por la

tasa aproximada de gasto de combustible (Diesel) de estas unidades. Paralelo a esto, se consultaron documentos de la planta de trituración actual del proyecto, la cual contaba con la misma maquinaria para la trituración de material que la cotizada y elegida en este caso de estudio. Lo anterior fue suficiente para elegir un dato de consumo de combustible. A este consumo se le entrega el nombre de “C<sub>FE</sub>”, que se refiere al consumo de combustible de fuentes estacionarias.

Paralelamente a esto, se manipularon los datos disponibles de cantidad de RCD pétreos y de material de cantera con la finalidad de obtener información en unidades adecuadas para la medición de las emisiones de carbono de las fuentes estacionarias. Se debe mencionar que se analizaron dos escenarios: con la implementación de la alternativa de reciclaje planteada y sin la implementación de esta. La cantidad de material de cantera a transportar y triturar es diferente en ambos casos. Para mayor claridad en este aspecto se explican ambos escenarios en la siguiente tabla.

**Tabla 18.** *Explicación de los escenarios planteados.*

Sin reciclaje de RCD pétreos (escenario como se gestionó en Puerto Antioquia en la realidad)	Con la implementación de la alternativa de reciclaje propuesta para este caso de estudio
1. El material de cantera se traslada desde su punto de extracción hasta la planta de trituración actual, y posteriormente es llevado a su destino final: Puerto Antioquia (Distancia ida y vuelta= 216,8 km).	1. Los RCD pétreos generados en los frentes de obra se trasladarían hasta la planta de trituración que se tiene allí mismo (Distancia= 0,5 km). Los viajes hasta la escombrera ya no se realizarían.
2. Los RCD pétreos generados en el proyecto son trasladados a la Escombrera autorizada por el proyecto (Distancia ida y vuelta= 79,2 km).	2. El material de cantera se traslada desde su punto de extracción hasta Puerto Antioquia, sin pasar por la trituradora actual, ya que sería en el área del proyecto donde se realizaría la trituración (disminuyendo así la distancia ida y vuelta a 213 km). Una porción de los RCD pétreos sustituiría cierta parte del material de cantera, por lo que se disminuye el número de viajes hasta dicho punto.

Elaboración propia, 2024.

Teniendo en cuenta lo anterior, se calcularon los siguientes campos.



**Tabla 19.** *Cantidades de RCD y material de cantera, y datos necesarios del equipo de trituración en el escenario “sin reciclaje de RCD”.*

Cantidad de RCD para transportar (TN)	$M_{RCD} = \text{Dato previamente obtenido}$
Cantidad de material de cantera para triturar y transportar (TN)	$M_{MCs.r} = (V_{MC}(m3) * \rho_{MC}(kg/m3) * \frac{1 TN}{1.000 kg})$
Cantidad total para triturar mensualmente (mat. cantera) (TN)	$M_T = M_{MC}$
Rendimiento mínimo del equipo de trituración (planta externa) (TN/hr)	$R = M_T * \left(\frac{1 mes}{30 días}\right) * \left(\frac{1 día}{Hr_{trabajo diarias}}\right)$
Número de horas trabajadas por el equipo (hr/mes)	$Hr_{mes} = 30 días * Hr_{trabajo diarias}$

Elaboración propia, 2024.

**Tabla 20.** *Cantidades de RCD y material de cantera, y datos necesarios del equipo de trituración en el escenario “con reciclaje de RCD”.*

Cantidad de RCD para triturar y transportar (TN)	$M_{RCD} = \text{Dato previamente obtenido}$
Cantidad de material de cantera para triturar y transportar (TN)	$M_{MCc.r} = (V_{MC}(m3) * \rho_{MC} \left(\frac{kg}{m3}\right) * \frac{1 TN}{1.000 kg}) - (M_{RCD})$
Cantidad total para triturar mensualmente (RCD + mat.cantera) (TN)	$M_T = M_{RCD} + M_{MC}$
Rendimiento mínimo del equipo de trituración (planta externa) (TN/hr)	$R = M_T * \left(\frac{1 mes}{30 días}\right) * \left(\frac{1 día}{Hr_{trabajo diarias}}\right)$
Número de horas trabajadas por el equipo (hr/mes)	$Hr_{mes} = 30 días * Hr_{trabajo diarias}$

Elaboración propia, 2024.

Nota 1:  $M_{RCD}$  y  $V_{MC}$  son datos que se obtuvieron en la fase 2 del presente caso de estudio.

Nota 2:  $Hr_{trabajo diario}$  es un valor establecido por tanteo, pues la idea es que se obtenga un valor de rendimiento R menor a la máxima capacidad de trituración que posee el equipo de cotizado y elegido (130 TN/hr)

Donde:

- $M_{RCD}$ = Masa de RCD pétreos.
- $M_{MCc.r}$ = Masa del material de cantera “con reciclaje”.
- $M_{MCs.r}$ = Masa del material de cantera “sin reciclaje”.
- $\rho$ =densidad;  $\rho_{MC}$ =2.000 kg/m3.
- $V_{MC}$ = Volumen de material de cantera.

Para ambos escenarios se calcularon los apartados de las tablas anteriores para cada mes de evaluación.

Posteriormente, se adecuó la información para la medición de emisiones de CO<sub>2</sub> de las fuentes móviles. Para esto fue necesario calcular los siguientes campos para cada uno de los meses.

**Tabla 21.** Datos necesarios para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> de fuentes móviles.

Volumen de RCD pétreos a transportar (m <sup>3</sup> )	$V_{RCD} = M_{RCD} (TN) * \left(\frac{1.000 \text{ kg}}{1 \text{ TN}}\right) * \left(\frac{1 \text{ m}^3}{2.400 \text{ kg}}\right)$
Volumen de material de cantera a transportar (m <sup>3</sup> )	$V_{MC} = M_{MC} (TN) * \left(\frac{1.000 \text{ kg}}{1 \text{ TN}}\right) * \left(\frac{1 \text{ m}^3}{2.000 \text{ kg}}\right)$
Número de viajes para el transporte de los RCD pétreos	$\#viajes_{RCD} = \left(\frac{V_{RCD}}{14 \text{ m}^3}\right)$
Número de viajes para el transporte del material de cantera	$\#viajes_{MC} = \left(\frac{V_{MC}}{14 \text{ m}^3}\right)$
Distancia recorrida RCD pétreos	$D_{RCD} = (\#viajes_{RCD} * D_{Tx})$
Distancia recorrida material de cantera	$D_{MC} = (\#viajes_{MC} * D_{Ti})$

Elaboración propia, 2024.

Nota: Se calculan estos campos para los dos escenarios: “con reciclaje” y “sin reciclaje”. Varían las cantidades de material pétreo y las distancias de los trayectos; D<sub>Ti</sub> = Distancia del trayecto i.

Nota 2: La capacidad de carga del vehículo de transporte estándar es de 14 m<sup>3</sup>.

Los factores de emisiones utilizados (en kg CO<sub>2</sub>/L de combustible) se tomaron de la herramienta de cálculo del Protocolo GHG. Esta es una serie de hojas de cálculo en un archivo .xlsx, en las cuales se presentan factores de emisión para diferentes tipos de recursos naturales, y fuentes de emisiones móviles y estacionarias. Hay que destacar de igual forma, que los valores de estos factores varían dependiendo de la locación del caso de estudio.

Escogidos los factores de emisión, ya se tenían todos los datos numéricos necesarios para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> de ambos escenarios: “con reciclaje” y “sin reciclaje”. En la siguiente tabla se pueden observar los cálculos necesarios para obtener el valor global de las emisiones.

**Tabla 22.** Cálculos para la contabilidad de emisiones de CO<sub>2</sub> de las actividades de transporte y trituración para ambos escenarios planteados.

Emisiones de carbono asociadas al transporte de RCD pétreos (kg CO <sub>2</sub> )	$E_{Trans.RCD} = (F * C_{FM} * D_{Ti})$
Emisiones de carbono asociadas al transporte de material de cantera (kg CO <sub>2</sub> )	$E_{Trans.MC} = (F * C_{FM} * D_{Ti})$
Emisiones de carbono asociadas al proceso de trituración de RCD pétreos y material de cantera (kg CO <sub>2</sub> )	$E_{Trit} = (F * C_{CE} * D_{Ti})$
Emisiones totales de CO <sub>2</sub> (ka CO <sub>2</sub> )	$E_{TOT} = (E_{Trans.RCD} + E_{Trans.MC} + E_{Trit})$

Elaboración propia, 2024.

Así, se llegó al final del procedimiento metodológico, obteniendo todos los resultados esperados para el posterior análisis y discusión.

## 5. Análisis de resultados

### 5.1. Resultados de la Fase 1: Obtención de información

#### 5.1.1. Selección de la alternativa óptima para el tratamiento de los RCD pétreos generados en Puerto Antioquia y hallazgos preliminares del manejo ambiental.

A partir de la revisión de la literatura, se identificó que los RC pueden reincorporarse al ciclo productivo después de un proceso de reciclaje, el cual incluye la separación, trituración y acondicionamiento del material en la planta de tratamiento. Del acondicionamiento final podrían producirse agregados áridos finos o gruesos y, bloques prefabricados (Fan et al., 2022; AMVA, 2020).

Paralelamente, durante las visitas de inspección, se observó que la principal característica de los RCD pétreos generados en Puerto Antioquia es su homogeneidad (como se puede evidenciar cuantitativamente en la *Sección 5.2.1*), debido a que son el resultado de derrames de concreto y restos provenientes de la fabricación de vigas y camisas para pilotes (ver de la *Figura 13* a la *Figura 20*).

En las primeras semanas del periodo de prácticas académicas se identificaron siete puntos de acopio de RCD pétreos, y a medida que los frentes de obra se desplazaban, otros dos acopios de RCD fueron implementados.

**Figura 13.** Camisas para pilotes.



**Figura 14.** Vigas longitudinales para el viaducto.



**Figura 15.** Área de prefabricados; donde se fabrican las camisas para pilotes.



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2024

**Figura 16.** Área de pretensado; donde se culmina la fabricación de las vigas.



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2024.

**Figura 17.** Derrame de concreto en Mejor Esquina.



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2024.

**Figura 18.** Recolección de derrame de concreto.



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2024.

**Figura 19.** RCD pétreos generados; acopio 1. **Figura 20.** RCD pétreos generados; acopio 2.



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2024.



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2024.

De acuerdo con el AMVA, 2020, se pueden producir concreto con hasta un 30 % más de resistencia si se fabrica con agregados obtenidos a partir de un acondicionamiento de RCD. Poder llegar a estos resultados depende, entre otras cosas, de la homogeneidad de la materia prima; por esto es por lo que la alternativa de producir agregados es la óptima en el caso de Puerto Antioquia (Ulsen et al., 2021).

Un manejo ambiental enfocado a la recirculación de recursos no es algo que se pueda dar a la ligera; se requiere de una excelente planeación y un control frecuente y eficiente. Durante el periodo de prácticas se hizo evidente que la gestión ambiental en una obra de la magnitud de Puerto Antioquia es una tarea ardua en la que los gestores de los contratistas debían interactuar con muchos colaboradores para que los PMA se ejecutaran de la mejor manera posible, sin embargo, un 100 % de eficiencia en el manejo se dificultaba a medida que la cantidad de personal era mayor; en la segunda mitad del 2024 se dio el pico laboral en la obra.

La segregación de residuos fue uno de los principales retos a lo largo de toda la ejecución de las obras civiles para este caso de estudio: la separación en la fuente dependía, claramente, de todos los colaboradores, por lo que además de ser un reto ambiental, se transformaba a su vez en un tema social, ya que las costumbres de cada trabajador de la obra podían hacer que se cayeran en facilismos como arrojar residuos sólidos comunes como bolsas de agua en el suelo, en recipientes que no correspondían o incluso en sitios para el almacenamiento de RCD como chatarra, escombros (RCD pétreos) y residuos de PVC. Esto es algo que sobre el papel se puede prever tentativamente,

---

no obstante, para una etapa de planeación se debe contemplar un 100 % de cumplimiento en los planes de manejo, con el objetivo de que el proyecto haga notoria su sostenibilidad ambiental.

Para la reutilización o reciclaje de los RCD pétreos es crucial que estos sean homogéneos, y mucho más si el propósito es reincorporarlos como agregados para la producción de nuevo concreto; para este último tipo de aprovechamiento es mucho más conveniente si el material de descarte son solo residuos del concreto; los estudios existentes revisados para el propósito de este informe indican que el concreto puede adquirir propiedades de mayor resistencia si se produce con agregados de concreto reciclado (AMVA, 2020; Ulsen, 2021).

El planteamiento del reciclaje de los RCD pétreos generados en Puerto Antioquia se dio porque en las visitas preliminares se observó una aparente homogeneidad en estos; un diagnóstico y la proposición de un hipotético escenario donde se impulsará la economía circular fueron vistos como posibilidades interesantes donde se explorarían diversos retos implícitos en una profesión como la ingeniería.

### **5.1.2. Cotización de alternativas de reciclaje de los RCD generados en el área de estudio**

En el ámbito nacional, el reciclaje de RCD pétreos es un negocio ambiental poco explorado, y las pocas empresas en el territorio nacional que se dedican a esto reciben material de múltiples clientes, que, en la reestructuración del marco normativo de los RCD, deben incrementar año a año el porcentaje de RCD generados que se reincorporan al ciclo productivo, por lo que se proyecta que este puede ser un negocio con una demanda constante. La trituración es una actividad que puede tener un costo de capital considerable, pero a su vez, la retribución hace que el negocio sea rentable para la demanda actual.

Se contactaron tres gestores de RCD dentro del territorio: Industrial Conconcreto S.A.S, Reciclados Industriales S.A.S, e Indural, todos con instalaciones en Girardota – Antioquia; estas empresas tratan los RCD del Valle de Aburrá y de municipios vecinos, y los reincorporan al ciclo productivo en forma de bloques prefabricados. Para el periodo del presente informe, ninguno de los tres gestores comercializaba la maquinaria para el reciclaje de los RCD. en el proceso de cotización se consultó a los representantes de estas compañías si podían entregar información sobre

el equipo de trituración, y la respuesta fue negativa debido a que no estaban autorizados a brindar información que pudiera ayudar a una posible competencia.

La búsqueda de equipo especializado de trituración requerido se realizó con compañías del exterior. Fue así como se llegó a Metso, una empresa de maquinaria pesada finlandesa que ofrece, entre otra maquinaria, múltiples equipos de trituración de material pétreo; dependiendo de las necesidades del cliente se tiene una amplia gama de equipos disponibles. Solo este proveedor de maquinaria pesada comercializaba equipo de trituración en Colombia, esto probablemente hace que mucha de la demanda en el sector de la minería y del reciclaje de RCD pétreos acuda a ellos.

Indagando en el catálogo de Metso, se llegó a la claridad de que las trituradoras de mandíbula (ver **Figura 21**) se utilizan como una trituración primaria, y que, si se quieren producir materiales con tamaños de partícula del orden de los agregados para la fabricación del concreto, se tiene que combinar este proceso primario con un tratamiento de trituradora de cono, la cual se puede acoplar para distintos tamaños de partícula (ver **Figura 22**). Gecolsa es el distribuidor oficial de Metso en Colombia, por lo que la cotización pudo realizarse con un agente de ventas de esta empresa nacional.

Es importante contar con compañías que ofrezcan este tipo de soluciones a nivel nacional, ya que el mercado de este tipo de equipos se inclina contundentemente hacia Asia y Europa, haciendo que costos asociados a el transporte, ensamblaje, mantenimiento, repuestos y garantía, incrementen. Esta apreciación no solo aplica para empresas y/o proyectos interesados en el reciclaje de RCD pétreos, sino que el sector de la minería es un consumidor frecuente de este tipo de maquinaria.

**Figura 21.** Trituradora de mandíbula  
*Lockotrack LT106*



Tomado de Metso, 2024.

**Figura 22.** Trituradora de cono  
*Lockotrack LT200HP*



Tomado de Metso, 2024



Además de Metso – Gecolsa, y teniendo en cuenta lo interiorizado respecto al tipo de maquinaria necesaria, se examinaron opciones asiáticas para el tratamiento de los RCD. Se contactaron dos fabricantes de maquinaria para el acondicionamiento de material pétreo de China: GEP ECOTECH Co. Ltd y Henan Anshun Machinery Equipment Co. Ltd.

La siguiente tabla muestra información relevante sobre las compañías y las soluciones cotizadas para este informe.

**Tabla 23.** Información relevante sobre las compañías y las soluciones cotizadas

Proveedor	Presentación de la compañía.	Descripción del producto.
GEP ECOTECH	GEP ECOTECH es una compañía china especializada en la fabricación de maquinaria para el tratamiento de residuos sólidos: RCD, residuos orgánicos, neumáticos usados, residuos peligrosos y residuos sólidos municipales son algunos de sus campos de acción. La empresa se fundó en 2011 y su crecimiento ha sido notable; la respalda su presencia en más de 70 países y sus certificaciones internacionales de calidad (ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001).	Solución móvil para la trituración de RCD, con capacidad para producir de 150 a 350 TN de agregados por hora. Todos los componentes de esta alternativa operan con energía eléctrica, desde su módulo de chasis de oruga, que permite el desplazamiento autónomo, hasta las bandas transportadoras y los motores de las unidades de trituración. La unidad para el transporte funciona a control remoto. La potencia de toda la unidad es de 406 kW.
Metso - Gecolsa	Metso es una compañía finlandesa pionera en tecnologías sostenibles, soluciones integrales y servicios para los sectores de los agregados, el tratamiento de minerales y el refinado de metales. 150 años de recorrido desde su fundación, y su presencia en cerca de 50 países ponen a Metso en la cúspide de la jerarquía de equipos para la industria minera, tanto por la experiencia, como por calidad; cuenta con las siguientes certificaciones internacionales de calidad: ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001. Su amplia trayectoria en el sector la ha hecho inspiración para compañías emergentes alrededor del mundo.	El conjunto de soluciones móviles para minería y acondicionamiento de RCD de Metso consta de dos unidades de trituración: la trituradora de mandíbula Lokotrack LT106, encargada de la trituración primaria, y la planta de trituración en cono Lokotrack LT200HP. Ambas cuentan con chasis de oruga; permiten una alta producción de agregados (150 - 560 y 90 - 250 TN/hora respectivamente); tienen motores diésel CAT que logran una reducción de consumo de combustible de hasta un 15% en comparación con versiones anteriores de estas series de trituradoras (Lokotrack). Ambas unidades incluyen bandas transportadoras para el material, las cuales permiten conectarse directamente, sin necesidad de unidades de ensamble adicionales. Adicionalmente, las dos trituradoras cuentan con sistemas de encapsulación de polvo y pueden funcionar con control remoto.
Henan AnShun Machinery	Henan Anshun Machinery Equipment Co., Ltd. es una empresa china de alta tecnología especializada en maquinaria y equipos de minería. La respaldan 46 años de experiencia y presencia en 4 continentes. Además, cuenta con la certificación internacional de calidad ISO9001.	La solución móvil cotizada consta de un alimentador vibratorio, las unidades de trituración de mandíbula y de cono, y un tamiz vibratorio, además de la unidad transportadora de tráiler con ruedas; cada una de estas unidades se ensambla con la anterior y posterior y cuentan con motores eléctricos. La capacidad máxima de producción es de 350 TN/hr y la potencia de toda la unidad es de 722,5 kW.

Elaboración propia, 2024.

Los representantes de las tres empresas requirieron información técnica similar para realizar la cotización; datos como el tamaño máximo del material que entra, la capacidad de producción

requerida y el tamaño de partícula requerida del producto final fueron pedidos por los agentes de ventas. La **Tabla 24** muestra los datos entregados al personal de ventas de las compañías contactadas.

**Tabla 24.** Datos requeridos por los proveedores de maquinaria para realizar las cotizaciones.

Información requerida	Valor
Tipo de material a procesar	Canto rodado y RCD pétreos
Tamaño máximo del material de entrada	400 - 500 mm
Capacidad de producción	300 - 350 TN
Tamaño de partícula del producto final	25 y 19 mm

Elaboración propia, 2024.

Para encontrar los datos del tamaño final de la partícula y el tipo de material a procesar, fue necesario revisar en documentos disponibles en la base de datos de la interventoría, y adicionalmente consultar con los ingenieros civiles de esta dependencia. El diámetro de los agregados para el concreto depende de las características que se deseen en un proyecto específico para el producto final, por lo que no fue necesario acudir a fuentes externas de información. La información sobre el tamaño máximo del material se basó en las observaciones realizadas en las inspecciones semanales; en una de las semanas se llevó una cinta métrica y se midieron las fracciones de escombros de gran tamaño.

Hay que destacar que la actividad de cotizar maquinaria con empresas nacionales e internacionales es algo usual para los ingenieros, por lo que este primer acercamiento fortaleció habilidades blandas como la lengua extranjera y sirvió para establecer vínculos corporativos comunes en una profesión como la ingeniería.

Los documentos relacionados con las cotizaciones se encuentran en *Anexos/4*.

## **5.2. Resultados de la Fase 2: Manejo y consolidación de la información, y diagnóstico del manejo interno actual de los RCD pétreos**

### **5.2.1. Resultados del índice del manejo ambiental de los RCD pétreos generados en la plataforma *onshore* de Puerto Antioquia**

Como se mencionó en la sección de la metodología, el manejo ambiental interno de los materiales de interés fue evaluado teniendo en cuenta criterios establecidos en la normatividad

nacional e internacional de los RCD, adicionalmente se revisó el PMA de residuos sólidos del proyecto, sin embargo, en materia de acopios para residuos especiales aprovechables no se tenían especificaciones técnicas.

Los índices generan valores útiles para determinar un criterio. La validez de los resultados depende de diversas variables, entre ellas, si el índice ha sido estandarizado. El hecho de estar estandarizado permite, entre otras cosas, facilitar la comparación entre diferentes casos de estudio, mejorar la consistencia en la interpretación de los datos y garantizar la objetividad, al aplicar un marco común de análisis. Además, la estandarización contribuye a una mejor comunicación de resultados entre equipos técnicos. Sin embargo, un proceso de estandarización para un índice ambiental requiere una robusta búsqueda bibliográfica, tanto en el marco legal como en el ámbito científico, y puede tomar cierta cantidad de tiempo, dependiendo de las personas especializadas en función de la colaboración con el procedimiento.

El manejo ambiental de los RCD pétreos es un tema específico para el cual no existía un índice normalizado. Este fue formulado desde cero para el presente informe. Aunque se consultaron diversas fuentes de información tales como normativas locales e internacionales para definir los criterios de evaluación, los resultados obtenidos carecen de suficiente validez estadística para ser comparados con otros casos de estudio. Así pues, la información recopilada no se encuentra en un marco uniforme, como sucede cuando se cuenta con un índice estandarizado. Empero, los resultados cuentan con objetividad, teniendo en cuenta el contexto particular de Puerto Antioquia. Los criterios considerados abarcan no solo el PMA de residuos sólidos del proyecto, sino también aspectos relacionados con los PMA de recurso hídrico, de la calidad del aire y el de la señalización, y están basados en normativa existente de los RCD. Esto convierte el índice en un mecanismo de evaluación orientado hacia una gestión ambiental integral y holística.

El índice se evaluó 12 semanas, en un periodo que comprendió los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre. Debido a actividades de gestión documental prioritarias, en algunas semanas no se realizaron inspecciones y, por ende, en ellas, el índice no se evaluó (segunda semana de agosto, y tres semanas en octubre, esto se puede ver con más claridad en la siguiente tabla.

**Tabla 25.** *Número de inspecciones realizadas a cada acopio en el periodo de reporte*

Acopio	Periodo de reporte															Número de inspecciones por acopio	
	Agosto				Septiembre				Octubre					Noviembre			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	
A.1	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X	12
A.2	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	X	-	-	X	10
A.3	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X	12
A.4	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-	9
A.5	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	7
A.5.1	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	2
A. T5	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	X	-	-	-	3
A.6	X	-	X	X	X	X	X	-	X	-	-	-	X	X	X	X	11
A.7	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X	12

Elaboración propia, 2024.

Nota: “X” significa que se realizó la inspección, mientras que en donde se encuentra “-” no se realizó una inspección o el frente de obra y/o acopio no se adaptan a las condiciones mínimas para evaluar.

Se debe analizar la forma en que se recolecta la información y la logística que hay detrás de este proceso; el monitoreo constante es crucial para que los resultados obtenidos reflejen un escenario completo para el alcance definido. El hecho de que el monitoreo y la calificación dependieran solo de una persona alteró la continuidad de la información recopilada, pues en octubre se dejó de evaluar por tres semanas; y si bien se evaluó un buen número de semanas, no se pudo reflejar un 100 % de representatividad en los resultados, puesto que en esos periodos de tiempo en los que no se realizaron inspecciones pudieron suceder eventos que afectaran la calificación, de haberse realizado.

También es necesario recalcar que la ubicación de los frentes de trabajo en obra estaba directamente relacionada con la utilización o no utilización de acopios de RCD; el traslado de frentes de obra se dio en varias ocasiones. Debido a esto, se definió que para algunos acopios no aplicaba la calificación propuesta, incluso en semanas efectivas de inspección. En las siguientes figuras se aprecia esta situación.

**Figura 23.** Frente de trabajo del Acopio 5 el 07/11/2024; ya no se ejecutaban actividades generadoras de RCD pétreos.



Tomado de Aqua & Terra Consultores Asociados, 2024.

Los acopios A 5.1 y A.T5 fueron calificados en menos ocasiones que el resto, ya que, en octubre, cuando estos estaban en funcionamiento, no se pudieron realizar visitas de inspección por temas prioritarios de gestión documental; y para noviembre ya no se tenía en funcionamiento el A 5.1, y el A.T5 no se adaptaba a las condiciones mínimas para una calificación como acopio de RCD pétreos (se dispuso allí otro tipo de material de descarte).

La información recolectada cada semana calificada se introducía en el formato de la **Figura 12**. Al finalizar el periodo de reporte, y teniendo la totalidad de los datos, se calculó el índice para cada acopio y cada criterio, haciendo uso de la **Ecuación 3** y de la **Ecuación 4**. Las siguientes tablas ilustran el resultado final.

**Tabla 26.** Resultado del índice por acopio

Resultado del índice para cada acopio		
Acopio	Calificación cuantitativa global	Calificación cualitativa global
Acopio 1	78,00	Sobresaliente manejo ambiental.
Acopio 2	70,40	Sobresaliente manejo ambiental.
Acopio 3	56,67	Aceptable manejo ambiental
Acopio 4	55,11	Aceptable manejo ambiental
Acopio 5	53,71	Aceptable manejo ambiental
Acopio 5.1	No se tiene en cuenta, ya que dentro del periodo que se definió en el alcance, se obtuvieron pocos datos de este acopio (2).	
Acopio. Temp 5	No se tiene en cuenta, ya que dentro del periodo que se definió en el alcance, se obtuvieron pocos datos de este acopio (3).	
Acopio 6	46,91	Aceptable manejo ambiental
Acopio 7	44,33	Aceptable manejo ambiental

Elaboración propia, 2024.

Los resultados obtenidos reflejaron en general, una gestión ambiental aceptable para los puntos de almacenamiento de RCD pétreos, incluso algunos alcanzaron el rango de sobresaliente manejo ambiental. Los acopios A1, A2 y A3, todos ubicados en la zona llamada *Site Facilities*, donde se hacían los prefabricados, fueron los que mayor puntuación obtuvieron dentro de la clasificación definida en el índice (78,00, 70,40 y 56,67 respectivamente). La infraestructura de esta zona de trabajo estaba definida claramente y no presentó variación en el periodo de reporte, lo que hacía que: (1) los acopios tuvieran un punto fijo, y (2) que la estructura destinada para el almacenamiento tuviera mayores especificaciones técnicas, incluyendo sus paredes y suelo, hechas en concreto impregnado de resina epóxica. Lo anterior hacía que la clasificación para estos acopios fuera mayor que los demás en criterios como drenaje y control de sedimentos, y la dispersión de partículas.

La construcción de una obra como Puerto Antioquia trae consigo una variación constante en la ubicación de los frentes de obra. Esta circunstancia hizo que las condiciones de orden y aseo en ciertos acopios no fueran las mejores. De igual manera, hubo acopios que se instalaron por actividades específicas en algunas zonas de la obra y el periodo en que operaron estos fue corto. Se podría decir que era más conveniente no tenerlos en cuenta ni mencionarlos en este informe, pero su inclusión es útil para demostrar la variabilidad de una obra de infraestructura de gran proporción.

**Tabla 27.** Resultado del índice por criterio

Resultado del índice para cada criterio		
Criterio	Calificación cuantitativa global	Calificación cualitativa global
Segregación de residuos	74,99	Sobresaliente manejo ambiental.
Señalización	53,38	Aceptable manejo ambiental
Drenaje y control de sedimentos	44,19	Aceptable manejo ambiental
Dispersión de partículas	47,11	Aceptable manejo ambiental
Mantenimiento y limpieza	78,56	Sobresaliente manejo ambiental.

Elaboración propia, 2024.

Finalmente, se reportó la calificación de los acopios respecto a cada criterio, con ayuda de la **Ecuación 5**; los resultados se presentan a continuación.

**Tabla 28.** Clasificación de los acopios respecto a cada criterio

	Segregación de residuos	Señalización	Drenaje y control de sedimentos	Dispersión de partículas	Mantenimiento y limpieza
Acopio 1	96,67	40,00	100,00	55,00	98,33
Acopio 2	82,00	90,00	42,00	44,00	94,00
Acopio 3	73,33	20,00	43,33	56,67	90,00
Acopio 4	75,56	62,22	33,33	40,00	64,44
Acopio 5	51,43	80,00	20,00	54,29	62,86
Acopio 5.1	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Acopio. Temp 5	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Acopio 6	74,55	49,09	21,82	21,82	67,27
Acopio 7	51,67	40,00	23,33	50,00	56,67

Elaboración propia, 2024.

En cuanto al resultado del índice por criterio, se puede apreciar que los mayores fuertes en la gestión de los RCD pétreos en Puerto Antioquia son (1) la segregación, y (2) el mantenimiento y limpieza (ver **Tabla 27**). Los resultados obtenidos reflejaron en general, una gestión ambiental aceptable para los puntos de almacenamiento de RCD pétreos, incluso algunos alcanzaron el rango de sobresaliente manejo ambiental. Los acopios A1, A2 y A3, todos ubicados en la zona llamada Site Facilities, donde se hacían los prefabricados, fueron los que mayor puntuación obtuvieron dentro de la clasificación definida en el índice (78,00, 70,40 y 56,67 respectivamente). La infraestructura de esta zona de trabajo estaba definida claramente y no presentó variación en el periodo de reporte, lo que hacía que: (1) los acopios tuvieran un punto fijo, y (2) que la estructura



---

destinada para el almacenamiento tuviera mayores especificaciones técnicas, incluyendo sus paredes y suelo, hechas en concreto impregnado de resina epóxica (ver Tabla 4). Lo anterior hacía que la clasificación para estos acopios fuera mayor que los demás en criterios como drenaje y control de sedimentos, y la dispersión de partículas.

La construcción de una obra como Puerto Antioquia trae consigo una variación constante en la ubicación de los frentes de obra. Esta circunstancia hizo que las condiciones de orden y aseo en ciertos acopios no fueran las mejores. De igual manera, hubo acopios que se instalaron por actividades específicas en algunas zonas de la obra y el periodo en que operaron estos fue corto. Se podría decir que era más conveniente no tenerlos en cuenta ni mencionarlos en este informe, pero su inclusión es útil para demostrar la variabilidad de una obra de infraestructura de gran proporción

El hecho que se dé una buena separación trae consigo múltiples beneficios y es la justificación de que inclusive, con un manejo como el que se le dio a los RCD pétreos en el periodo de reporte, se podrían implementar alternativas para el aprovechamiento de estos. Se observó que los RCD pétreos almacenados en los acopios A1 y A2 constaron solo de RC, por lo que la alternativa de reciclaje propuesta podría ser viable técnicamente para estos. Vale mencionar que la mayor cantidad de RCD pétreos se vio precisamente en estos acopios, esto se puede evidenciar con mayor detalle en *Anexos/7*.

El drenaje y control de sedimentos fue un aspecto por mejorar dentro del manejo ambiental de los RCD pétreos, pues como se puede apreciar en la **Tabla 28**, a 4 de los 7 acopios evaluados se les asoció una insuficiencia en las condiciones de este criterio, y lo que hizo que el puntaje de este ascendiera a 44,19 y entrara en la clasificación de un manejo ambiental aceptable es que el A1 se calificó con un 100 y elevó el promedio. El hecho de que este criterio fuera el mayor punto débil tenía que ver con que la infraestructura de los acopios, en general, no incluía un cerramiento superior adecuado, lo que afectaba incluso la calificación de otro criterio: la dispersión de partículas. Es claro que la humectación de los RC, y RCD pétreos en general, podría afectar sus características y hacerlos no aptos para su reciclaje en forma de agregados para nuevo concreto.

Si se quisiera implementar una alternativa como la propuesta, los PMA del proyecto deberían estar planteados en pro de que se presenten las condiciones óptimas para el almacenamiento de RCD pétreos, y que así, sus características sean las requeridas por el área

---

técnica para la producción de nuevo concreto; y a su vez, para que su hipotético acondicionamiento previo sea menos complicado y costoso.

La formulación de este índice es un avance considerable para la gestión integral de RCD dentro de obras de infraestructura de gran envergadura, pero un estudio estadístico y normativo robusto es necesario para darle una validez extra a los resultados y así dar un paso hacia la estandarización de un mecanismo de evaluación ambiental para este tipo de residuos sólidos.

### **5.2.2. Estimación de RCD pétreos generados, concreto fabricado y de agregados adquiridos en el proyecto Puerto Antioquia en el periodo de análisis**

La consecución de la información de generación de RCD y material de cantera fue un paso importante en la orientación de este informe, varios hallazgos que direccionaron los resultados vinieron a partir de esta etapa. El primer descubrimiento para destacar fue que durante los primeros meses del 2024 no se registró de manera confiable la cantidad de RCD generados, lo que dificultó la tarea y se tuvo que plantear un método de estimación alternativo. Desde enero hasta mayo del año de reporte, los valores (en toneladas) reportados en los soportes eran pequeños teniendo en cuenta la dinámica de un proyecto de construcción de una terminal marítima de la envergadura de Puerto Antioquia.

Se revisaron distintos reportes de los procedimientos ingenieriles ejecutados en el primer semestre de dicho año y se constató que las actividades que implicaban la producción de concreto fueron en aumento, por lo que cifras como las mostradas en *Anexos/3/1* para los meses mencionados perdían credibilidad.

Los datos recolectados sobre la generación de RCD pétreos y de la cantidad de material para agregados y base granular necesarios se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 29.** Generación de RCD y cantidad de material de cantera requeridos en Puerto Antioquia en el periodo de evaluación del presente caso de estudio.

Ene 24 - Nov 24				
Mes	Concreto (m3)	RCD pétreos (TN)2	Agregados	
			Concreto (AG25 y AG 19) (m3)	Base granular (para precarga y pavimentos) (m3)
Enero	2.038,0	219,3	1.356,3	25.158,6
Febrero	3.531,0	380,0	1.356,3	25.158,6
Marzo	5.350,0	575,7	1.356,3	25.158,6
Abril	5.680,0	611,2	1.356,3	25.158,6
Mayo	5.137,0	454,9	1.356,3	25.158,6
Junio	4.889,0	1.064,6	1.356,3	25.158,6
Julio	4.493,0	839,0	10.396,0	No se requirió más de este material.
Agosto	4.485,0	1.494,6	16.591,0	
Septiembre	-	1.221,4	16.304,0	
Octubre	-	1.601,7	9.451,0	
Noviembre	-	2.322,2	10.024,0	

Elaboración propia, 2024.

Nota: Esta tabla se encuentra disponible en *Anexos/5*, esta hace parte de la matriz de la medición de emisiones de CO<sub>2</sub>.

La relación de causalidad entre la producción de concreto y la generación de RCD pétreos en obras como Puerto Antioquia, en las cuales la demanda de concreto se satisface en la misma obra, es un objeto de estudio que no ha sido explorado. Se tenía la opción de trabajar con datos de 7 meses (mayo – noviembre), sin embargo, se optó por realizar el método de la regla de tres expuesta en la **Ecuación 6** para contar con más datos.

Otro hallazgo evidente fue la gran diferencia entre el volumen de concreto fabricado y el volumen de material para base granular; esta fue la principal razón por la que se decidió que la maquinaria cotizada para el reciclaje de los RCD pétreos también podría cubrir las necesidades de trituración del material de la precarga. Como se puede apreciar en la **Figura 24**, la capacidad del equipo elegido es de 130 TN/hr. La adquisición de este equipo solo para la trituración de la cantidad de RCD pétreos generados, a primera impresión no es rentable económicamente para el proyecto, ya que la inversión sería muy alta para tan pocos agregados producidos, y el rendimiento de esta maquinaria permite triturar mucho más material.

Por último, se debe recalcar que la gran cantidad de material de cantera triturado necesario en Puerto Antioquia estuvo relacionada directamente con las condiciones iniciales del predio, el cual era un humedal antes de iniciar las actividades constructivas. Para la adecuación de este terreno se requirieron millones de m<sup>3</sup> de material de cantera, incluido el volumen del material para la precarga (posteriormente usado para pavimentos), que debía contar con características específicas de forma, porosidad y espacio intersticial, por ende, tenía que ser material triturado de cierto diámetro.

### **5.2.3. Elección de la mejor maquinaria entre las alternativas cotizadas**

Para realizar esta parte del procedimiento metodológico se pensó primero en matrices de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (DOFA); esto hubiera implicado realizar una para cada opción cotizada, y adicionalmente, no se tenía un marco unificado que permitiera la comparación entre las tres opciones valoradas. Es por esto por lo que se optó por la formulación de una matriz de decisión ponderada, que es una herramienta útil y válida al momento de escoger entre alternativas similares.

Con este tipo de matrices, el formulador, al asignarle pesos ponderados a los criterios a evaluar, le aporta un sustento estadístico a sus datos, que hacen que los resultados tengan un nivel de confianza mayor en comparación con otro tipo de métodos de escogencia. Es claro que el método utilizado para asignarle el peso a los criterios a evaluar es determinante para la validez de los resultados. Para el caso de estudio se buscó información en bases de datos científicas que ayudara con la definición de estos pesos, sin embargo, no se encontraron, por lo que se tenía que plantear un método alternativo.

La experiencia profesional es un criterio fundamental en proyectos de ingeniería, ya que influye directamente en la toma de decisiones y genera confianza en los procesos de una compañía. Por ello, se acudió a el juicio de 18 profesionales para evaluar este aspecto clave. Además, la diversidad de áreas de especialización de los encuestados enriqueció los resultados, aportando una perspectiva integral y holística.

Para cada criterio se hizo un promedio con las calificaciones que los profesionales le asignaron, lo que implica que el juicio de cada profesional tenía el mismo peso respecto al de los demás; estos resultados fueron los valores utilizados en los cálculos posteriores.

**Tabla 30.** *Peso correspondiente a la relevancia de cada criterio*

Criterio	Peso asignado del criterio
Costo inicial (capital inicial)	4,8
Rendimiento	4,6
Requerimiento energético.	3,1
Años de experiencia del fabricante y sus certificaciones de calidad.	3,6
Garantía ofrecida	3,1
Mantenimiento (costo, frecuencia, y facilidad de la labor).	3,7
Repuestos (disponibilidad de los repuestos en el lugar y su costo).	4,0
Minimización de impactos ambientales.	2,6

Elaboración propia, 2024.

De acuerdo con los resultados, el costo inicial asociado a la maquinaria fue el criterio más importante para tener en cuenta para la escogencia de una alternativa sobre las demás, con un peso de 4,8. El rendimiento le sigue con un peso ponderado de 4,6, y se puede considerar este como el criterio condicionante para la elección, esto se debe a que la capacidad de trabajo del equipo debe satisfacer la demanda de material a triturar. Aunque una opción pueda representar una inversión inicial favorable para los intereses del proyecto, si no cumple con los requerimientos operativos, el costo inicial podría quedar en segundo plano o incluso llevar al descarte de esa alternativa.

Destaca a su vez la poca valencia que se asignó a la minimización de impactos asociados. Igualmente, las compañías fabricantes se han dedicado últimamente a optimizar sus modelos para que los impactos al medio ambiente se reduzcan al momento de operación de sus equipos. El requerimiento energético, con un puntaje de 3,1, está directamente relacionado con estos impactos, ya que determina el consumo de recursos naturales necesarios para el funcionamiento óptimo del equipo (combustibles fósiles, electricidad, etc), los cuales contribuyen a las emisiones de GEI.

En un rango intermedio se encontraron criterios como la garantía, el mantenimiento y los repuestos, los cuales están directamente relacionados con costos de operación. Estos criterios no beneficiaron a los equipos del mercado chino, pues la gran distancia entre la casa matriz y Puerto Antioquia puede comprometer al proyecto en términos operativos: la disponibilidad de repuestos y el costo de estos, el costo del mantenimiento y su frecuencia, fueron aspectos tenidos en cuenta

para decretar que las opciones chinas no eran una alternativa viable y realista para la propuesta de reciclaje propuesta en el caso de estudio.

Los pesos anteriores fueron los factores multiplicativos que se utilizaron para la calificación de cada maquinaria cotizada. La suma ponderada se realizó para las tres alternativas cotizadas, y los resultados se pueden visualizar en la siguiente tabla.

**Figura 24.** Captura de pantalla de la matriz de decisión ponderada del proyecto

Criterio	Peso asignado del criterio	GEP ECOTECH		Metso - Gecolsa		Henan AnShun Machinery	
		Valor o consideración	Calificación	Valor o consideración	Calificación	Valor	Calificación
Costo inicial (capital inicial)	4,8	\$ 366.000,00 USD; ver Nota 1.	5	\$ 1.606.299,18 USD; ver Nota 1.	3	\$ 421.826,00 USD; ver Nota 1.	5
Rendimiento	4,6	150 - 350 TN/hr	4	130 TN/hr	2	350 TN/hr	4
Requerimiento energético	3,1	Electricidad. Potencia total: 406 kW	3	Diésel. 320 galones/día	3	Electricidad. Potencia total: 722,5 kW	3
Años de experiencia del fabricante y sus certificaciones de calidad	3,6	13 años; presencia en +70 países. Certificación internacionales: ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001.	4	150 años; presencia en cerca de 50 países. Certificaciones internacionales: ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001.	5	46 años; presencia en 4 continentes. Certificaciones internacionales: ISO9001.	2
Garantía ofrecida	3,1	12 meses después de la instalación o 18 desde que deja la fábrica.	3	12 meses o 2000 horas. El distribuidor nacional GECOLSA ofrece este servicio en las instalaciones del cliente sin costo adicional.	5	12 meses después de la instalación o 18 desde que deja la fábrica.	3
Mantenimiento (costo, frecuencia, y facilidad de la labor).	3,7	Fabricante chino, que ofrece mantenimiento gratuito los primeros 12 meses, capacitación sobre operación, diagnóstico y mantenimiento rápido. Ver Nota 4.	2	Ofrece capacitación sobre, mantenimiento, operación y buenas prácticas para el cuidado del equipo.	5	Fabricante chino, ofrece capacitación sobre operación y mantenimiento gratuito los primeros 12 meses después de la instalación. Ver Nota 4.	2
Repuestos (disponibilidad de los repuestos en el lugar y su costo).	4,0	Ver Nota 4	2	Distribuidor colombiano (GECOLSA), que tiene disponibilidad de repuestos y los ofrece en tiempo corto.	5	Ver Nota 4	2
Minimización de impactos ambientales.	2,6	Ver Nota 4	4	Todos los equipos para la trituración de Metso cuentan con sistemas de encapsulación de polvo.	5	Ver Nota 4	4
		Suma ponderada	101,2	Suma ponderada	117,9	Suma ponderada	94,0

Elaboración propia, 2024.

Nota: Para mayor detalle remitirse a *Anexos/4/4*.

Las calificaciones otorgadas a criterios como la garantía, el mantenimiento y los repuestos fueron clave en la elección del equipo de la compañía finlandesa Metso. Esto se debió a que Gecolsa, su distribuidor en Colombia, ofrecía soluciones capaces de facilitar los procesos logísticos, optimizar el tiempo y reducir los costos operativos.

El resultado más revelador fue que la alternativa ganadora fue la que requería una inversión inicial mayor. Esto sugiere que, aunque este criterio fue el de mayor peso en la toma de decisiones, no fue un factor definitorio. Este hallazgo, si bien se limita a este caso de estudio debido a que se estaban comparando opciones cotizadas para el mismo, podría ser un aspecto general de las obras de ingeniería.

Para mayor detalle remitirse a *Anexos/4*.

---

### **5.3. Resultados de la Fase 3: Evaluación ambiental a través de la contabilidad de emisiones de CO<sub>2</sub>**

Se ha hecho necesario, y en ocasiones una obligación, valorar los impactos ambientales implícitos en la materialización de un proyecto de infraestructura. Una obra de la magnitud de Puerto Antioquia tuvo responsabilidades ambientales considerables, por lo que políticas en pro de la sostenibilidad ambiental fueron requeridas. Uno de los objetivos de sostenibilidad que se trazó el proyecto fue diagnóstico ambiental, y es allí donde los indicadores ambientales tuvieron gran relevancia. Existen múltiples indicadores, pero el más utilizado son las emisiones de GEI, y en específico, de CO<sub>2</sub>, y durante la fase constructiva de Puerto Antioquia se evaluaron trimestralmente los impactos de esta forma. Por lo anterior, se decidió trabajar con este mismo indicador.

En este caso de estudio, no se siguieron los lineamientos de alguna de las guías estandarizadas del Protocolo GHG. Aunque el *Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte* es una guía bien definida, no se implementó en este escenario, ya que no se alineaba con los objetivos del trabajo, que se centraban en el diagnóstico ambiental de una actividad específica (el reciclaje de RCD). Además, no se disponía de información suficiente para determinar cuáles operaciones dependían financiera y operativamente de PBCU o de COTEMA; sin embargo, se sabía que la trituración de material pétreo, aunque estaba vinculada al proyecto, no era controlada por ningún contratista o por PBCU.

#### **5.3.1. Determinación de distancias para los trayectos ligados al transporte**

Se tuvieron que definir los puntos estratégicos y los trayectos, y medir sus respectivas distancias (en km).

1. Puntos estratégicos: [1] Puerto Antioquia, [2] Cantera, [3] Trituradora autorizada, y [4] Escombrera Israel Plaza.
2. Trayectos: [1] Puerto Antioquia - Cantera; ida y vuelta (yendo a la trituradora), [2] Puerto Antioquia - Cantera; ida y vuelta (sin pasar por la trituradora), [3] Frentes de obra - Trituradora in-situ, y [4] Puerto Antioquia – Escombrera Israel Plaza.

A continuación, se ilustra la ubicación de los puntos destacados.

**Figura 25.** *Ubicación de los puntos destacados.*



Adaptado de Google Earth, 2024.

Se definieron convenciones para cada uno de los trayectos, como se puede apreciar a continuación.

**Tabla 31.** *Trayectos definidos para la medición de emisiones de CO<sub>2</sub>.*

Trayecto	Nombre	Distancia (km)
1. Puerto Antioquia - Cantera; ida y vuelta (yendo a la trituradora).	Trayecto 1 (T1)	216,8
2. Puerto Antioquia - Cantera; ida y vuelta (sin pasar por la trituradora).	Trayecto 2 (T2)	213,0
3. Frentes de obra - Trituradora in-situ.	Trayecto 3 (T3)	0,5
4. Puerto Antioquia – Escombrera (ida y vuelta).	Trayecto 4 (T4)	79,2

Elaboración propia, 2024.

Nota: Todas las distancias fueron extraídas de Google Maps, a excepción de "Acopios - Trituradora in-situ".

Es necesario recalcar que los valores de los trayectos tienen un nivel de incertidumbre relacionado con la precisión del servidor Google Maps en el cálculo de distancias; para la simplificación de los cálculos asociados a este proyecto se omitió este error, pues la determinación de este tipo de incertidumbre no estaba contemplada dentro del alcance definido.



### 5.3.2. Consumo de combustible para las fuentes móviles y de combustión estacionaria

El consumo de combustible del vehículo estándar para el transporte de material se calculó a partir de los datos recopilados en la encuesta a los conductores de tres de los vehículos (como se explicó en la *Sección 4.2.3*; el resultado se muestra a continuación.

**Tabla 32.** Consumo de combustible para las fuentes móviles

Vehículo estándar de transporte: tractocamión DAF de la montaña CF 480			
Distancia recorrida entre la cantera Agregados Mutatá y el Proyecto			
	Vehículo 1 (km)	Vehículo 2 (km)	Vehículo 3 (km)
Kilometraje recarga actual	67.511	56.587	44.355
Kilometraje recarga pasada	67.173	56.278	44.009
Distancia recorrida entre recargas	338	309	346
Promedio de las distancias recorridas entre recargas de los tres vehículos (km)	331		
Volumen del tanque de combustible (gal)	97		
Cantidad de combustible para el cálculo	50		
Consumo de combustible (L/km)	0,6		

Elaboración propia, 2024.

Nota 1: Si bien el tanque de los vehículos es de 97 galones, para cuidado del motor nunca se trabaja con el tanque a mínima capacidad, por lo que siempre se deja lleno en cada recarga, y se hace cuando se ha consumido la mitad del combustible; por lo anterior, el cálculo se hará con 50 galones.

Nota 2: Para simplificar el cálculo (y a falta de datos estandarizados sobre el transporte) se hace la suposición de que se consume la misma cantidad de combustible por cada kilómetro; no se tiene en cuenta el peso que se transporta, ni las condiciones del terreno.

Por su parte, se determinó que, para la fuente de combustión estacionaria evaluada para este caso de estudio, es decir, la trituradora cotizada y elegida en la *Sección 5.2.3*, el consumo de combustible es de 320 gal/día, que equivale a 50,5 L/hr (unidad requerida para los cálculos de emisiones de CO<sub>2</sub>).

### 5.3.3. Adecuación de los datos para la contabilidad de emisiones: escenario “sin reciclaje de RCD pétreos”

Como se expone en la *Tabla 18*, para el escenario “sin reciclaje” el material de cantera es llevado desde este punto de extracción, hasta Puerto Antioquia, no sin antes pasar por la trituradora

autorizada en Chigorodó. Este pequeño trayecto desde la vía nacional hasta la trituradora (ida y vuelta), suma una distancia de 3,8 km al recorrido entre Puerto Antioquia y la Cantera (ida y vuelta; sin pasar por la trituradora) (ver **Tabla 31**; comparar T1 y T2). Por su parte, los RCD pétreos son llevados desde el proyecto hasta la escombrera, lo que significa un viaje de 79,2 km por cada 14 m<sup>3</sup> de material (33,6 TN, teniendo en cuenta una densidad del concreto de 2.400 kg/m<sup>3</sup>).

Adicionalmente, aunque las emisiones generadas por la trituración en el escenario “*sin reciclaje*” son externas al proyecto, se incluyeron en la contabilización. Esto se debe a que no se realizó un inventario de emisiones corporativo, como se explicó previamente, sino un cálculo de las emisiones asociadas a las actividades de reciclaje y transporte de los RCD pétreos, así como al transporte y trituración del material de cantera.

**Tabla 33.** Datos de cantidades de material y del equipo de trituración asociados a la medición de emisiones de CO<sub>2</sub> (escenario “*sin reciclaje*”).

Ene 24 - Nov 24	Cantidad de RCD para transportar (TN)	Cantidad de material de cantera para triturar y transportar (TN)	Distancia recorrida trayecto 4 (RCD pétreos) (km)	Distancia recorrida trayecto 1 (material de cantera) (km)	Número de horas trabajadas por el equipo de trituración (hr/mes)
Mes					
Enero	219,3	53.029,8	554,4	410.619,2	450,0
Febrero	380,0	53.029,8	950,4	410.619,2	450,0
Marzo	575,7	53.029,8	1.425,6	410.619,2	450,0
Abril	611,2	53.029,8	1.504,8	410.619,2	450,0
Mayo	454,9	53.029,8	1.108,8	410.619,2	450,0
Junio	1.064,6	53.029,8	2.534,4	410.619,2	450,0
Julio	839,0	20.792,0	1.980,0	161.082,4	270,0
Agosto	1.494,6	33.182,0	3.564,0	257.124,8	270,0
Septiembre	1.221,4	32.608,0	2.930,4	252.572,0	270,0
Octubre	1.601,7	18.902,0	3.801,6	146.556,8	270,0
Noviembre	2.322,2	20.048,0	5.544,0	155.228,8	270,0

Elaboración propia, 2024.

Nota: Para mayor detalle en los cálculos dirigirse a **Anexos/5/I**.

Para la evaluación de ambos escenarios, las horas diarias de funcionamiento del equipo de trituración se establecieron por tanteo, pues se necesitaba un valor que hiciera que el rendimiento mínimo requerido de trituración para cubrir la demanda de material fuera menor a la máxima capacidad de trituración del equipo cotizado y elegido (130 TN/hr), así se garantizaba que la maquinaria podría triturar la totalidad de la demanda de material. En este orden de ideas, para que esta condición se cumpliera, se asumió que el equipo de trituración trabajaría 15 horas al día durante

---

los primeros 6 meses del año 2024, mientras que para el segundo semestre solo funcionaría 2 horas al día; esto para ambos escenarios planteados.

Para este escenario, se utilizó la distancia del T1 para el material de cantera, y la del T4 para los RCD pétreos. Asimismo, se debe mencionar que la totalidad del material triturado sería para este caso material virgen de cantera, pues no se trituran los RCD pétreos.

Se debe destacar también que para los cálculos del transporte eran necesarios datos de volumen (en m<sup>3</sup>), pues lo que determina la cantidad de material que se puede transportar es el espacio disponible en la volqueta definida como estándar para el transporte, y esto se mide en volumen. Por otra parte, la capacidad del equipo de trituración está dada en toneladas. Por lo anterior, todos los datos de RCD pétreos y material de cantera fueron necesarios tanto en m<sup>3</sup> como en toneladas.

#### **5.3.4. Adecuación de los datos para la contabilidad de emisiones: escenario “*con reciclaje de RCD pétreos*”**

La alternativa de reciclaje de los RCD constó de la trituración de los RCD pétreos de la obra (los cuales, si se realiza una segregación eficiente, serían RC en su mayor proporción), con el objetivo de reincorporarlos a la cadena productiva en forma de agregados para la producción del concreto en el proyecto; de esa manera se omitiría el transporte por el T4 (ver *Tabla 31*). El peso de RCD pétreos compensaría una fracción del material de cantera extraído y transportado hasta el puerto. De igual manera, la capacidad del equipo de trituración Metso podría procesar la totalidad de la demanda de material de cantera de la obra, por lo que ya no se trabajaría con el T1 para el material de cantera, sino con el T2, que no incluye el ingreso a la planta de trituración actual.

A continuación, se muestran los resultados para este escenario.

**Tabla 34.** Datos de cantidades de material, distancias recorridas y del equipo de trituración asociados a la medición de emisiones de CO<sub>2</sub> (escenario “con reciclaje”).

Ene 24 - Nov 24	Cantidad de RCD para triturar y transportar (TN)	Cantidad de material de cantera para triturar (TN)	Distancia recorrida trayecto 3 (RCD pétreos) (km)	Distancia recorrida trayecto 2 (material de cantera) (km)	Número de horas trabajadas por el equipo de trituración (hr/mes)
Mes					
Enero	219,3	52.810,4	3,5	401.931,0	450,0
Febrero	380,0	52.649,7	6,0	400.653,0	450,0
Marzo	575,7	52.454,0	9,0	399.162,0	450,0
Abril	611,2	52.418,5	9,5	398.949,0	450,0
Mayo	454,9	52.574,8	7,0	400.014,0	450,0
Junio	1.064,6	51.965,1	16,0	395.328,0	450,0
Julio	839,0	19.953,0	12,5	151.869,0	270,0
Agosto	1.494,6	31.687,4	22,5	241.116,0	270,0
Septiembre	1.221,4	31.386,6	18,5	238.773,0	270,0
Octubre	1.601,7	17.300,3	24,0	131.634,0	270,0
Noviembre	2.322,2	17.725,8	35,0	135.042,0	270,0

Elaboración propia, 2024.

Nota: Para mayor detalle en los cálculos dirigirse a *Anexos/5/1*.

Para este escenario, se utilizó la distancia del T2 para el material de cantera, y la del T3 para los RCD pétreos. El material se trituraría en el área de la obra, y la totalidad de este es una sumatoria entre RCD pétreos y material virgen de cantera.

Las diferencias principales son el número de viajes necesarios y las distancias recorridas para el transporte de RCD pétreos entre ambos escenarios; al final estos son los valores que terminan siendo determinantes para el resultado de las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que para ambos casos hipotéticos el número de horas trabajadas por el equipo son las mismas (estas están determinadas por la cantidad de material a triturar).

Como se explicó en la *Sección 5.3.3*, todos los datos de RCD pétreos y material de cantera fueron necesarios tanto en m<sup>3</sup> como en toneladas.

### 5.3.5. Elección de los factores de emisiones de CO<sub>2</sub>

Para este caso de estudio se utilizaron factores los siguientes factores de emisión.

- Factor para emisiones de fuentes móviles:

**Figura 26.** Factor utilizado para las emisiones de CO<sub>2</sub> de fuentes móviles (utilizado para la actividad del transporte).

Region	Fuel	Fossil CO <sub>2</sub> EF	Biogenic CO <sub>2</sub> EF	EF Unit
Other <sup>1</sup>	Jet Kerosene	2,57		kg/L
Other <sup>1</sup>	Aviation Gasoline	2,18		kg/L
Other <sup>1</sup>	Motor Gasoline/Petrol	2,29		kg/L
Other <sup>1</sup>	On-Road Diesel Fuel	2,91		kg/L
Other <sup>1</sup>	Residual Fuel Oil	3,01		kg/L
Other <sup>1</sup>	Liquefied Petroleum Gases (LPG)	1,47		kg/L
Other <sup>1</sup>	Compressed Natural Gas (CNG)	1,88		kg/m <sup>3</sup>
US	Kerosene - Type Jet Fuel	9,75		kg/US Gallon
US	Aviation Gasoline	8,31		kg/US Gallon
US	Motor Gasoline	8,78		kg/US Gallon
US	Diesel Fuel	10,21		kg/US Gallon
US	Residual Fuel Oil <sup>2</sup>	11,27		kg/US Gallon
US	Liquefied Petroleum Gases (LPG)	5,68		kg/US Gallon
US	Compressed Natural Gas (CNG)	0,054		kg/scf
US	Liquefied Natural Gas (LNG)	1,50		kg/US Gallon

Mobile Combustion - Fuel Use | Mobile Combustion - Distance | Electricity US | Electricity CN, TW, BR, TH, UK

Tomado de Protocolo GHG, 2024.

Se eligió el factor de emisiones de CO<sub>2</sub> para el Diesel de “otras” regiones, ya que solo se tenían valores específicos para Estados Unidos y el Reino Unido.

➤ Factor para emisiones de combustión estacionaria:

**Figura 27.** Factor utilizado para las emisiones de CO<sub>2</sub> de la combustión estacionaria (utilizado para la actividad del reciclaje - trituración).

Fuel	Lower Heating Value (LHV) (or NCV) TJ/Gg	CO <sub>2</sub> emission factors for fuel consumption data that have been supplied on different measurement bases					
		Energy basis	Mass basis	Fuel density information <sup>1</sup>		Liquid basis	Gas basis
		kg CO <sub>2</sub> /TJ	kg CO <sub>2</sub> /tonne	Of liquids (kg/litre of fuel)	Of gases (kg/m <sup>3</sup> of fuel)	kg CO <sub>2</sub> /litre	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Crude oil	42,3	73.300	3.100,59	0,87		2,708	
Orimulsion	27,5	77.000	2.117,50				
Natural Gas Liquids	44,2	64.200	2.837,64				
Motor gasoline <sup>2</sup>	44,3	69.300	3.069,99	0,75		2,288	
Aviation gasoline	44,3	70.000	3.101,00	0,70		2,185	
Jet gasoline	44,3	70.000	3.101,00	0,70		2,185	
Jet kerosene	44,1	71.500	3.153,15	0,82		2,572	
Other kerosene	43,8	71.900	3.149,22	0,85		2,672	
Shale oil	38,1	73.300	2.792,73				
Gas/Diesel oil <sup>2</sup>	43,0	74.100	3.186,30	0,91		2,910	
Residual fuel oil <sup>2</sup>	40,4	77.400	3.126,96	0,96		3,005	
Liquid petroleum gases	47,3	63.100	2.984,63	0,49		1,473	
Ethane	46,4	61.600	2.858,24				
Naphtha	44,5	73.300	3.261,85	0,73		2,376	
Bitumen	40,2	80.700	3.244,14				
Lubricants	40,2	73.300	2.946,66	0,90		2,647	

Stationary Combustion | Mobile Combustion - Fuel Use | Mobile Combustion - Distance | Electricity US | Electricity CN, TW, BR, TH, UK | Mobile Combustion

Tomado de Protocolo GHG, 2024.

Se eligió el factor de emisiones de CO<sub>2</sub> del Diesel líquido. Para los dos tipos de fuente de emisiones, la unidad del factor es de kg CO<sub>2</sub>/L, esto indica que la cantidad de emisiones está directamente relacionada con el volumen de combustible que se gasta. Para el presente caso de

estudio, el volumen de combustible empleado por el transporte se asoció a las distancias recorridas, mientras que para la fuente de combustión estacionaria se relacionó con las horas de funcionamiento de la máquina.

### 5.3.6. Contabilidad de emisiones de CO<sub>2</sub> de ambos escenarios: “sin reciclaje” y “con reciclaje”

La finalización de los resultados llegó con el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> para las circunstancias planteadas. Las cuales se presentaron en forma de tabla, como se aprecia a continuación.

**Tabla 35.** Emisiones de CO<sub>2</sub> sin el reciclaje de RCD pétreos generados en Puerto Antioquia.

SIN RECICLAJE DE RCD PÉTREOS				
Mes	Emisiones de carbono asociadas al transporte de RCD pétreos (kg CO <sub>2</sub> )	Emisiones de carbono asociadas al transporte de material de cantera (kg CO <sub>2</sub> )	Emisiones de carbono asociadas al proceso de trituración de material de cantera (kg CO <sub>2</sub> )	Emisiones totales (kg CO <sub>2</sub> )
Enero	967,98	716941,12	66086,10	783995,20
Febrero	1659,40	716941,12	66086,10	784686,62
Marzo	2489,10	716941,12	66086,10	785516,32
Abril	2627,38	716941,12	66086,10	785654,60
Mayo	1935,96	716941,12	66086,10	784963,18
Junio	4425,06	716941,12	66086,10	787452,28
Julio	3457,08	281249,87	39651,66	324358,61
Agosto	6222,74	448939,90	39651,66	494814,30
Septiembre	5116,48	440990,71	39651,66	485758,85
Octubre	6637,59	255888,17	39651,66	302177,42
Noviembre	9679,82	271029,48	39651,66	320360,96
Total	45218,59	5999744,85	594774,90	6639738,34

Elaboración propia, 2024.

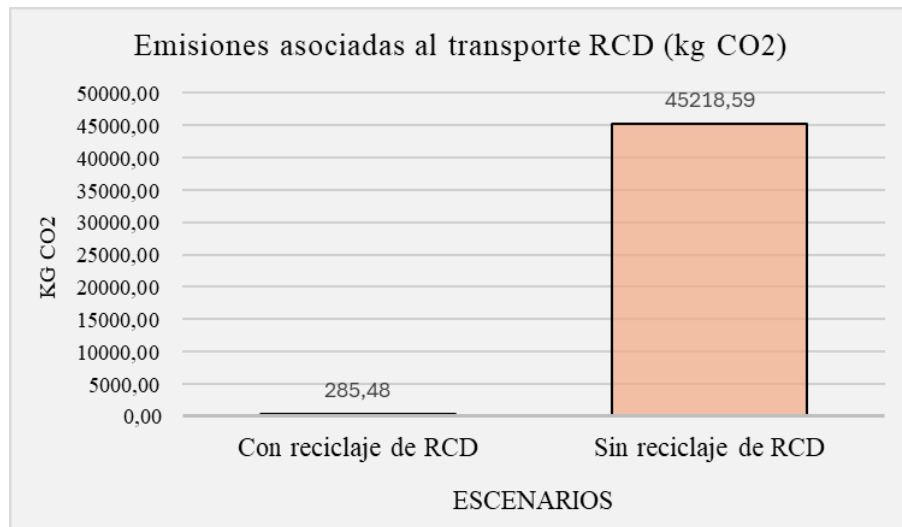
**Tabla 36.** Emisiones de CO<sub>2</sub> reciclando los RCD pétreos generados en Puerto Antioquia.

CON RECICLAJE DE RCD PÉTREOS				
Mes	Emisiones de carbono asociadas al transporte de RCD pétreos (kg CO <sub>2</sub> )	Emisiones de carbono asociadas al transporte de material de cantera (kg CO <sub>2</sub> )	Emisiones de carbono asociadas al proceso de trituración de RCD pétreos y material de cantera (kg CO <sub>2</sub> )	Emisiones totales (kg CO <sub>2</sub> )
Enero	6,11	701771,53	66086,10	767863,74
Febrero	10,48	699540,14	66086,10	765636,72
Marzo	15,71	696936,85	66086,10	763038,66
Abril	16,59	696564,95	66086,10	762667,64
Mayo	12,22	698424,44	66086,10	764522,76
Junio	27,94	690242,69	66086,10	756356,73
Julio	21,83	265163,27	39651,66	304836,76
Agosto	39,29	420988,54	39651,66	460679,49
Septiembre	32,30	416897,66	39651,66	456581,62
Octubre	41,90	229832,96	39651,66	269526,52
Noviembre	61,11	235783,33	39651,66	275496,10
Total	285,48	5752146,36	594774,90	6347206,74

Elaboración propia, 2024.

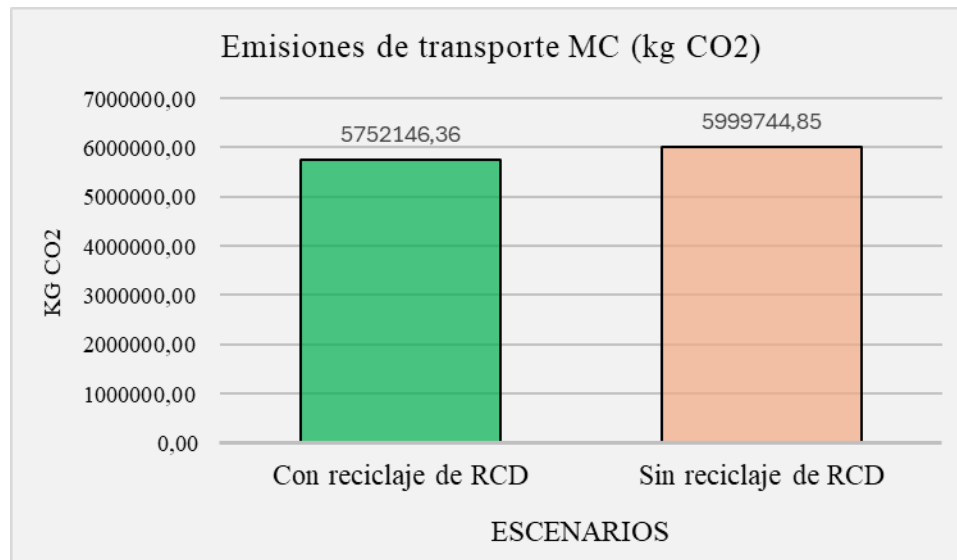
Los datos para la mayoría de los cálculos se manejaron con una cifra decimal, no obstante, las emisiones de CO<sub>2</sub> se reportaron con dos cifras decimales debido a que los factores de emisiones que proveen las guías de WRI & WBCSD, 2004 tienen dos cifras, lo que hace que el resultado de una operación aritmética que los involucre tenga este mismo número de decimales (para este caso, ya que el resto de los datos solo tienen una).

**Figura 28.** Comparativa entre las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al transporte de RCD para ambos escenarios planteados.



Elaboración propia, 2024.

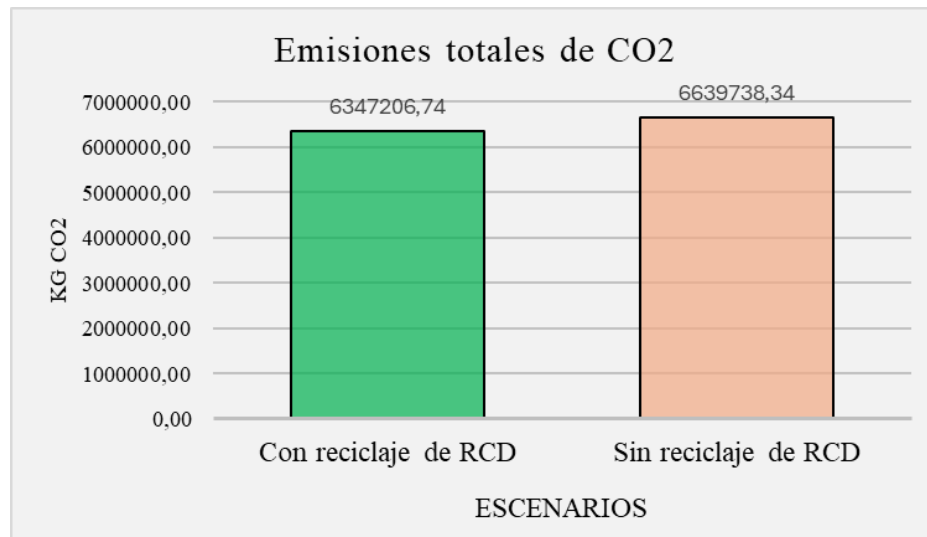
**Figura 29.** Comparativa entre las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al transporte de material de cantera para ambos escenarios planteados.



Elaboración propia, 2024.



**Figura 30.** Comparativa entre las emisiones totales de CO<sub>2</sub> para ambos escenarios planteados.



Elaboración propia, 2024.

Para el escenario “con reciclaje” se presentó una disminución del 4,41 % en emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a el escenario donde no se reciclan los RCD pétreos, que corresponde a 292.531,60 kg de CO<sub>2</sub>.

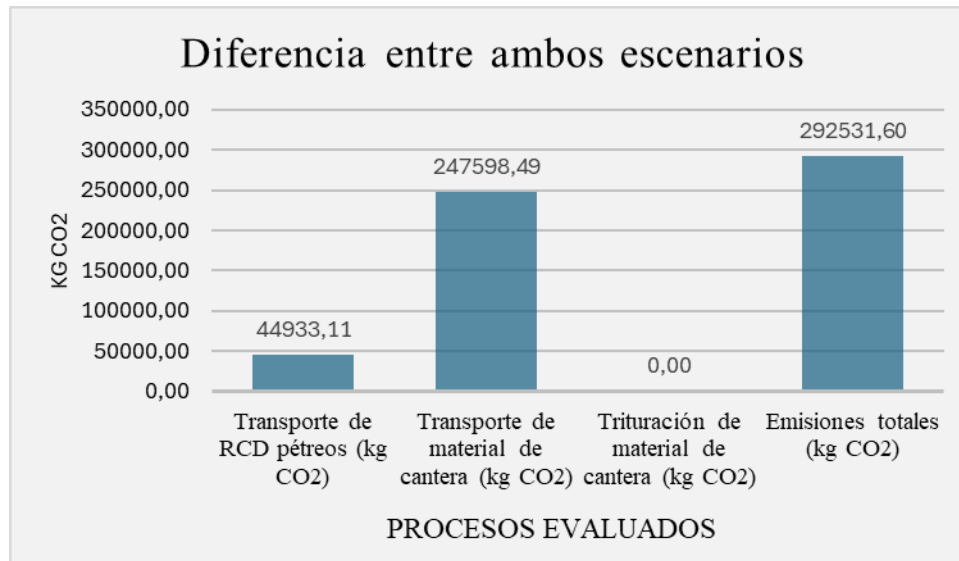
La diferencia más destacada entre ambos escenarios fue el aporte de emisiones de CO<sub>2</sub> generado por el transporte de RCD pétreos. Con el reciclaje de estos residuos, las emisiones se limitaron a 285,48 kg de CO<sub>2</sub>, mientras que, sin reciclaje, ascendieron a 45.218,59. No obstante, aunque este contraste es el más evidente, no representa la mayor magnitud. El transporte de material de cantera generó la mayor disparidad en emisiones, con una diferencia de 247.598,49 kg de CO<sub>2</sub> entre ambos escenarios, lo que equivale al 84,58 % de la reducción total (292.531,60 kg de CO<sub>2</sub>).

Cubrir una parte de la demanda de material de cantera con RCD pétreos fue la causa de la mayor contribución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> alcanzada en el cálculo. Por cada viaje ida y vuelta desde el proyecto hasta la cantera sin pasar por la trituradora actual se ahorrarían 6,63 kg de CO<sub>2</sub>, y adicionalmente, con la cantidad total de RCD pétreos que reemplazaría al material de cantera se evitarían 383 viajes de más de 200 kilómetros durante el periodo enero – noviembre de 2024. Paralelamente, es necesario resaltar la disparidad entre las distancias asociadas al transporte de RCD pétreos entre ambos escenarios planteados, pues el total de kilómetros recorridos sin el

reciclaje RCD ascenderían a 25.734,9, mientras que si se reciclaran los RCD pétreos en la misma obra solo se recorrerían 163,5 kilómetros.

Vale recalcar que para ambos escenarios las emisiones ligadas a las fuentes de combustión estacionaria alcanzaron el mismo valor, ya que para ambos casos hipotéticos el número de horas trabajadas por el equipo son las mismas (estas están determinadas por la cantidad de material a triturar).

**Figura 31.** Diferencia entre los valores de emisiones de CO<sub>2</sub> entre ambos escenarios.



Elaboración propia, 2024.

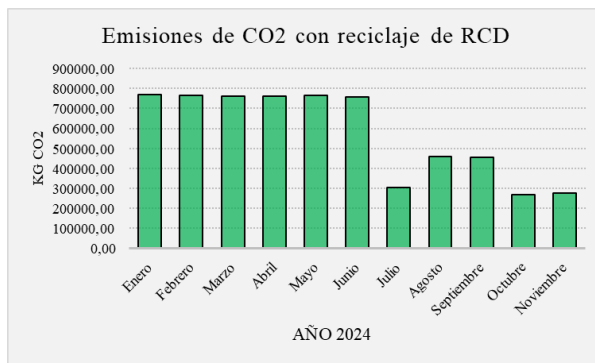
Para todas estas diferencias, el valor mayor siempre correspondió a el del escenario sin reciclaje de RCD pétreos.

Respecto a la trituración, a pesar de que para el presente caso de estudio no se presentaron diferencias en emisiones de CO<sub>2</sub> entre ambos escenarios, dependiendo de qué guía estandarizada se use, las emisiones asociadas a este proceso podrían variar si se plantearan los dos mismos escenarios. El *Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte* de las emisiones de GEI indica que se deben establecer claramente los límites organizacionales y operacionales del proyecto, para así poder definir quien tiene el control financiero de las operaciones. Siendo así, una actividad externa -pero asociada- al proyecto podría incluirse o no en la contabilidad de emisiones, dependiendo del porcentaje de participación de la compañía en dicho proceso (WRI & WBCSD, 2004).

Si se utilizara el Estándar Corporativo para medir las emisiones de COTEMA o PBCU definiendo una participación del 0% en el proceso de trituración, el escenario “con reciclaje de RCD pétreos” se vería en una desventaja que no permitiría soportar la sostenibilidad ambiental para el proyecto, puesto que con el escenario de trituración si se tendrían que inventariar estas emisiones como propias, aportando así 594.774,90 kg de CO<sub>2</sub> que no se tendrían para el escenario alterno. Las emisiones contabilizadas siguieron un patrón similar al de la metodología de la guía de *Contabilidad y Reporte para el Ciclo de Vida de Productos*, también del Protocolo GHG. Con el enfoque de este estándar se analizan todas las etapas del ciclo de vida del producto, y también está diseñado para empresas, pero está diseñado inventariar las emisiones de GEI relacionadas específicamente con productos o actividades individuales.

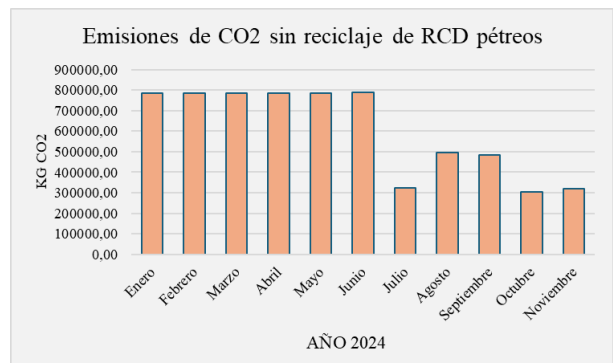
Paralelamente, se observó que durante la primera mitad del año la demanda de material de cantera fue significativamente mayor que en el segundo semestre, debido a la necesidad de grandes cantidades de base granular para la precarga del terreno y, posteriormente, para la fabricación de pavimentos, además de los requerimientos de material para concreto. Esto se reflejó en una disminución de los kilogramos totales de CO<sub>2</sub> emitidos durante la segunda mitad del año en ambos escenarios, ya que todo el material de cantera requerido se destinó exclusivamente a la producción de agregados de concreto, como se detalla a continuación.

**Figura 32.** Emisiones de CO<sub>2</sub> mes a mes con reciclaje de RCD pétreos.



Elaboración propia, 2024.

**Figura 33.** Emisiones de CO<sub>2</sub> mes a mes sin reciclaje de RCD pétreos.



Elaboración propia, 2024.

La tendencia es similar para ambos casos, pero las magnitudes son un poco menores cada mes para el escenario en el que se reciclan los RCD pétreos.

Para culminar, es de alta importancia aclarar que el escenario “sin reciclaje de RCD pétreos” no representó el 100% del manejo real de este material en Puerto Antioquia para el periodo

---

de reporte; si bien se trasladó una porción a la escombrera autorizada; desde finales de septiembre del 2024 gran parte de los RCD pétreos fueron donados a las comunidades de Nueva Colonia y de Riogrande, corregimientos del municipio de Turbo. Esto hizo que COTEMA y PBCU economizaran significativamente gastos relacionados con el transporte de RCD pétreos, ya que estos sitios poblados se encuentran cerca del proyecto: Nueva Colonia a 2,7 kilómetros, y Riogrande a 12,6.

Múltiples posibilidades de estudio se desprenden de este informe, puesto que no se tuvieron en cuenta las emisiones relacionadas con el uso de la tierra, del cargue y descargue del material, entre otros puntos importantes. Adicionalmente, un análisis de viabilidad y factibilidad económica asociado a esta propuesta es necesario para un megaproyecto como Puerto Antioquia, y puede significar la continuación del presente estudio, o emplearse en otros casos de obras de infraestructura de gran magnitud.

---

## 6. Conclusiones

Las funciones del cargo permitieron un acercamiento a temas y situaciones de alta importancia a nivel empresarial, entre los que destacan: (1) la participación en la elaboración de informes trimestrales de cumplimiento ambiental dirigidos a asesores de bancos internacionales, (2) la contribución en situaciones que involucraban un relacionamiento con autoridades ambientales como la ANLA y Corpourabá, y con agencias como la ANI, (3) la revisión de documentos de gran significancia ambiental para el desarrollo del proyecto, y (4) la ejecución de actividades de control ambiental a las procesos constructivos de los contratistas. A su vez, se afianzó progresivamente una lengua extranjera como el inglés, adaptada a un lenguaje técnico de nivel corporativo internacional.

Por otra parte, con las actividades relacionadas con la propuesta del presente informe se adquirió experiencia en acciones relevantes en una rama del conocimiento como la ingeniería, tales como cotizaciones y la toma de decisiones entre alternativas de maquinaria. De igual manera se demostró una habilidad como la creatividad con la formulación del índice para el diagnóstico del manejo ambiental de los RCD pétreos, y se tuvo un primer acercamiento a uno de los procedimientos más valorados en la industria: la contabilidad de emisiones de GEI. Por todo lo anterior, se concluye que el periodo de prácticas fue un espacio de tiempo enriquecedor en el que se fortalecieron múltiples habilidades blandas y profesionales, en el que se forjó una simbiosis profesional entre el practicante y la empresa.

Uno de los principales retos identificados en el proyecto en el periodo de práctica fue el cumplimiento del PMA de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos de Puerto Antioquia. Se corroboró que un 100% de eficiencia tiene una probabilidad remota, pues es un aspecto ambiental que se transforma en un desafío social. Las costumbres y el tipo de condicionamiento educativo en cuestiones ambientales que cada uno de los colaboradores del proyecto haya tenido previamente estaban directamente relacionados con el orden y aseo en la obra, el cual se dificultaba más a medida que la cantidad de personal era mayor. Esto claramente estaba relacionado con el propósito principal de este caso de estudio, pues dependiendo de la homogeneidad y limpieza de los RCD pétreos, podría ser más o menos complicado su acondicionamiento previo y reciclaje.

Al hablar del mercado nacional, tres factores hacen que las oportunidades en la industria del reciclaje de los RCD pétreos serán cada vez mayores y llamativas: (1) el fortalecimiento en el

---

país sector constructivo, que trae consigo una demanda creciente de RCD pétreos, (2) el hecho de que las metas de aprovechamiento de RCD incrementen paulatinamente, y (3) que la oferta para el reciclaje de los RCD pétreos está dentro del catálogo de pocas empresas. Si bien la fabricación de maquinaria para el reciclaje de los RCD pueda que no sea una opción llamativa para la industria colombiana, el tratar estos y comercializarlos nuevamente promete ser una buena opción de negocio. En Colombia, las empresas con mayor renombre en esta área de la economía, se dedican a reincorporar estos residuos en forma de prefabricados, sin embargo, no se tiene registro de una industria colombiana que reutilice el material de interés en forma de agregados para la producción de nuevo concreto (AMVA, 2020).

Respecto al índice para el diagnóstico del manejo ambiental de los RCD se debe mencionar que es un mecanismo de evaluación orientado hacia una gestión ambiental integral y holística, ya que siendo un tema directamente relacionado con residuos sólidos, los criterios considerados no dejaron de lado aspectos asociados con dos matrices abióticas de vital importancia, como lo son el recurso hídrico y el aire, y adicionalmente están ligados con las condiciones de salud y seguridad en el trabajo en el proyecto. Se concluye que este índice en un avance significativo para la gestión integral de los RCD dentro de las obras de infraestructura, sin embargo, para alcanzar resultados cada vez más válidos y representativos, es necesaria la estandarización de este, un proceso que trae implícito un esfuerzo mayor asociado a un estudio estadístico de mayor nivel y a una búsqueda rigurosa de normativa de respaldo.

Con los resultados de la caracterización del manejo se evidenció que los RCD pétreos fueron manejados de manera aceptable dentro de Puerto Antioquia. Los acopios ubicados en la zona *Site Facilities* obtuvieron los mejores resultados en todos los criterios de evaluación, mientras que los acopios en los frentes de trabajo variables presentaron mayores dificultades para ser evaluados y registraron valores más bajos dentro del rango definido para el índice. Además, uno de los criterios con mejor desempeño fue la segregación en la fuente, un hallazgo de gran relevancia para este estudio, ya que, como se mencionó previamente, mientras más uniforme sean los RCD pétreos, mejores serán las propiedades de los agregados y, en consecuencia, del nuevo concreto. Cabe destacar que, en muchas de las visitas de inspección, se observó que para los acopios donde llegaban mayor cantidad de RCD pétreos, en su mayor proporción, estos constaban de residuos de concreto.

---

Asimismo, los puntos para mejorar en cuanto a la gestión del material objeto de estudio es el control de sedimentos y la dispersión de sedimentos; se observó que las estructuras de los acopios distaban de una condición ideal, ya que ninguno contaba con cobertura superior y algunos se encontraban expuestos totalmente a las posibles corrientes de aire.

Se concluye, además, que existe un nivel de incertidumbre no cuantificado en los datos relacionados con la generación de RCD pétreos durante los primeros cinco meses del año (enero a mayo). La relación de causalidad entre la producción de concreto y la generación de RCD pétreos en obras donde la demanda de concreto se satisface internamente en el sitio de construcción representa un tema de estudio aún no explorado. En cuanto a los datos consolidados (ver *Tabla 10*), se puede observar una gran diferencia entre el material de cantera requerido en el primer semestre con el necesitado en el segundo; y al analizar la cronología del proyecto, se deduce que la naturaleza del ecosistema existente en el predio donde se ubica la plataforma *onshore*, fue el principal factor que motivó la extracción significativa de material de cantera para la precarga y estabilización del terreno.

En relación con el mecanismo de elección de la maquinaria óptima, se confirma que la matriz de decisión ponderada ofrece los mayores beneficios estratégicos para casos como este, en los que se debe seleccionar entre varios equipos de características similares para una actividad específica. Asimismo, se concluye que el método empleado para asignar peso a los criterios evaluados contribuyó a reducir la incertidumbre estadística y demostró una validez suficiente en el ámbito de la ingeniería, dado que la experiencia profesional es un factor crucial en la industria de la construcción.

La elección de la maquinaria más costosa ratifica que si bien el costo inicial fue considerado como el criterio más relevante a tener en cuenta para la toma de decisiones relacionadas con el presupuesto de un proyecto, en ocasiones los beneficios asociados pueden hacer que la alternativa que más capital requiera sea la más apropiada; pues otros factores de alta importancia como el rendimiento del equipo, y de mediana importancia, como la disponibilidad de repuestos y el mantenimiento, pesan lo suficiente como para superar a alternativas más económicas. Las calificaciones asignadas a estos criterios hicieron que el equipo de Metso se impusiera, y esto está directamente relacionado con el hecho de que Gecolsa, una compañía nacional, fuera el distribuidor oficial del gigante finlandés en Colombia; las facilidades que ofrecían en términos de

---

mantenimiento y repuestos brindaban seguridad financiera al proyecto en comparación con las dos alternativas chinas.

Respecto a la contabilidad de emisiones de GEI, se concluye que este es un procedimiento necesario para cualquier empresa o proyecto ingenieril interesado en lograr objetivos de sostenibilidad ambiental; esta actividad hace parte de una gestión enfocada en diagnosticar los impactos, y en la formulación de estrategias de mitigación de la contaminación, la cual se va haciendo día a día en una obligación corporativa. La guía utilizada y el enfoque escogido para el inventario de emisiones determina la manera en cómo se contabilizan y reportan los resultados, por lo que se deduce que el planteamiento de un alcance bien definido es crucial para lograr los resultados esperados.

De lo anterior se deriva que, teniendo en cuenta los objetivos del presente trabajo, la guía más apropiada para seguir era la de *Contabilidad y Reporte para el Ciclo de Vida de Productos*, y si bien no se siguió al pie de la letra, el principio de este estándar se utilizó para inventariar las emisiones de GEI relacionadas con la actividad del reciclaje de los RCD pétreos, estas, de acuerdo con el alcance, involucraba los procesos de transporte y trituración del material.

En síntesis, se demostró que el reciclaje de los RCD en Puerto Antioquia pudo ser una alternativa de economía circular sostenible ambientalmente, en la que se alcanzaría una reducción de cerca de 300.000 kg de CO<sub>2</sub>. De acuerdo con los resultados, cubrir una parte de la demanda de material de cantera con RCD pétreos fue la mayor contribución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> alcanzada; poder evitar 383 viajes de más de 200 kilómetros significó el 84,58 % del total de la disminución lograda en el escenario en el que se reciclaban los RCD pétreos. También se corroboró que el la trituración en la misma obra es una alternativa interesante para disminuir las emisiones de GEI provenientes del transporte desde el sitio de generación hasta una escombrera autorizada.

Sin embargo, se concluye que la forma el principio con el que se contabilizaron las emisiones del proceso de trituración en el escenario “*sin reciclaje de RCD pétreos*” fue el factor determinante para que el escenario “*con reciclaje de RCD pétreos*” tuviera menores emisiones de CO<sub>2</sub>; si se hubiera seguido lo establecido en el *Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte*, los resultados habrían sido totalmente dispares, ya que una trituración en la misma obra implica que la participación del proyecto en el proceso es del 100 %, mientras que sin el reciclaje sería de 0%.



Por último, la trituración in-situ de materiales de cantera y RCD pétreos se prevé como una opción viable y factible principalmente en megaproyectos, donde el uso intensivo de recursos naturales implica un alto costo económico y un impacto ambiental significativo. Sin embargo, su implementación requiere una logística compleja y costos asociados que pueden representar un esfuerzo considerable.

---

## Referencias

- Aqua y Terra Consultores Asociados. 2015. Estudio de Impacto Ambiental para la Modificación de Licencia Ambiental Para el Proyecto de Construcción y Operación de un Terminal Portuario de Graneles Sólidos en el Municipio de Turbo.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). (2020). Guía regional con los procesos técnicos y jurídicos para el manejo integral de Residuos de Construcción y Demolición. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/nueva-guia-rcd-2023-area-metropolitana.aspx>
- Chica, L. M., & Beltrán, J. M. (2018). Caracterización de residuos de demolición y construcción para la identificación de su potencial de reúso. *DYNA (Colombia)*, 85(206), 338-347. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68824>
- Elshaboury, N., Abobakr Al-Sakkaf, A., Abdelkader, E.M., & Alfalah, G. (2022). Construction and Demolition Waste Management Research: A Science Mapping Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 4496. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084496>
- Enciso, C. O. (2020). Aprovechamiento de llantas usadas e inclusión de pavimento asfáltico reciclado (RAP) para estructuras de pavimento en vías de. Repositorio Universidad Nacional. Recuperado de [https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78798/1013639789%20-%20Documento\\_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78798/1013639789%20-%20Documento_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fan, C.C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S.-J. (2016). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, 708–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>
- Ferronato, N., Fuentes Sirpa, R. C., Guisbert Lizarazu, E. G., Conti, F., & Torretta, V. (2022). Construction and demolition waste recycling in developing cities: management and cost analysis. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(9), 24377–24397. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23502-x>
- Ginga, C.P., Ongpeng, J.M.C., & Daly, M.K.M. (2020). Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production. *Materials*, 13(13), 2970. <https://doi.org/10.3390/ma13132970>
- Jayasinghe, C., Fonseka, W. M. C. D. J., & Abeygunawardhene, Y. M. (2016). Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. *Construction and Building Materials*, 102, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.136>
- Jiménez, J. D. (2024, 20 de abril). A menos de un año de estrenar Puerto Antioquia: así es el gigante que revolucionará a Urabá. El colombiano. <https://www.elcolombiano.com/antioquia/obras-puerto-antioquia-uraba-inauguracion-IF24307953>

- Kou, S.-C., Zhan, B.-J., & Poon, C.-S. (2012). Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 36, 566–571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.063>
- Kunzig, R. (2020). The End of Trash. *National Geographic Magazine*. March 2020 Issue: 42-71.
- Lu, D., Iqbal, A., Zan, F., Liu, X., & Chen, G. (2021). Life-cycle-based greenhouse gas, energy, and economic analysis of municipal solid waste management using system dynamics model. *Sustainability*, 13(4), 1641. <https://doi.org/10.3390/su13041641>
- Marrero, M., Puerto, M., Rivero-Camacho, C., Freire-Guerrero, A., & Solís-Guzmán, J. (2017). Assessing the economic impact and ecological footprint of construction and demolition waste during the urbanization of rural land. *Resources, Conservation, and Recycling*, 117, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.020>
- Mihai, F.C. (2019). Construction and demolition waste in Romania: The route from illegal dumping to building materials. *enrXiv*. <https://doi.org/10.31224/osf.io/v95rc>
- Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., & Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38(102196), 102196. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102196>
- Odabas, T. (2007). The effect of heavy metal concentrations in solid waste on methane production in landfill areas. Dokuz Eylül University.
- Peng, Z., Lu, W., & Webster, C. J. (2021). Quantifying the embodied carbon saving potential of recycling construction and demolition waste in the Greater Bay Area, China: Status quo and future scenarios. *The Science of the Total Environment*, 792(148427), 148427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148427>
- Puerto Antioquia. (s/f). Com.co. Recuperado el 14 de julio de 2024, de <https://www.puertoantioquia.com.co/>
- Puerto Antioquia. (2024). Informe de Cumplimiento Ambiental N°5. Turbo, Colombia: Puerto Antioquia.
- Renolith. (2023, 23 de marzo). *Sustainable Pavements Using Renolith and Recycled Concrete Aggregates*. Renolith. <https://renolith.com.au/renolith-recycled-concrete-aggregates/>
- Resolución 0472 de 2017 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones. 28 de febrero de 2017.
- Rodrigues, F., Carvalho, M. T., Evangelista, L., & de Brito, J. (2013). Physical– chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 52, 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.023>
- Shen, L. Y., Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Drew, D. (2004). Mapping approach for examining waste management on construction sites. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(4), 472–481. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2004\)130:4\(472\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2004)130:4(472))

- Tam, V. W. Y. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation, and Recycling*, 52(5), 821–828. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.12.001>
- Tchobanoglous G., Theisen H., & Eliassen R. (1977). *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill Book Company; New York, NY, USA.
- Ulsen, C., Antoniassi, J. L., Martins, I. M., & Kahn, H. (2021). High quality recycled sand from mixed CDW – is that possible? *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.057>
- U.S EPA (U.S Environmental Protection Agency). (1998). Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States. Recuperado el 16 de julio de 2024, de chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglcdefindmkaj/https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03/documents/charact\_bulding\_related\_cd.pdf
- U.S EPA (U.S Environmental Protection Agency). (2015). Construction and Demolition Debris Management in the United States. Recuperado de chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglcdefindmkaj/https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/final\_cd-eol-management\_2015\_508.pdf
- Wang, J., Wu, H., Duan, H., Zillante, G., Zuo, J., & Yuan, H. (2018). Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3154–3166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.087>
- World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Revised edition). Washington, DC: World Resources Institute. <https://ghgprotocol.org>
- Yuan, L., Yang, B., Lu, W., & Peng, Z. (2024). Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research. *Environmental Impact Assessment Review*, 107(107551), 107551. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107551>

---

**Anexos**

**Tabla 37.** *Anexos*

<b>Anexo 1</b>	Metodología – diagrama.
<b>Anexo 2</b>	Índice RCD.
<b>Anexo 3</b>	Soportes RCD y materiales de construcción.
<b>Anexo 4</b>	Cotizaciones y elección del equipo óptimo.
<b>Anexo 5</b>	Evaluación ambiental.
<b>Anexo 6</b>	Mapas.
<b>Anexo 7</b>	Registro fotográfico.