



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PROPUESTA DE PLAN DE  
GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN  
(RCD) PARA UN MACROPROYECTO DE VIVIENDA: ESTUDIO DE CASO.**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil – Énfasis en Gerencia de Construcciones

Presentado por:

ANA SOFÍA FERNÁNDEZ CERÓN  
KEVIN ALEXANDER HOYOS BRAVO

Director:

Dr. MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO

Pontificia Universidad Javeriana Cali  
Facultad de Ingeniería y Ciencias

2025

## AUTORES

**Nombre:** Ana Sofía Fernández Cerón; Kevin Alexander Hoyos Bravo

**Correo:** [anasofiafernandez10@hotmail.com](mailto:anasofiafernandez10@hotmail.com); [kevinhoyos26@gmail.com](mailto:kevinhoyos26@gmail.com)

**Celular:** 3016449186; 3137033501

**Profesión:** Ingeniera civil; Ingeniero civil

**Nombre de la empresa:** Constructora Normandía; EHZ Construcciones S.A.S

**Cargo:** Coordinadora de presupuestos; Director de proyectos.

## **Dedicatoria**

*A Dios, porque nos dio la bendición de poder cumplir nuestras metas y sueños.*

*A nuestras familias, porque nos apoyaron e incentivaron a lograr cada objetivo trazado.*

*A Juan Carlos, por su constante apoyo y su amor paciente.*

*A Andrea mi esposa, por ser mi apoyo y mi fuente de motivación.*

## **Agradecimientos**

*A la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por brindarnos una formación académica de excelencia, por fortalecer nuestro pensamiento crítico y ético, por guiarnos en el camino hacia ser profesionales íntegros y por ser el espacio que impulsó el desarrollo de este proyecto de grado.*

*A nuestro director, Dr Manuel Alejandro Rojas Manzano, por su acompañamiento, orientación y exigencia que nos impulsó a ser mejores. Su compromiso, conocimiento y apoyo en este proceso fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.*

*A la empresa constructora, que de manera generosa permitió la ejecución del proyecto, facilitando el acceso a la información para el desarrollo de la investigación. Su colaboración fue esencial para la materialización de este proyecto.*

*Finalmente, a nuestros compañeros, quienes enriquecieron esta experiencia y nos acompañaron a lo largo de este camino de formación profesional.*

## Resumen

El acelerado crecimiento del sector de la construcción en municipios como Puerto Tejada, Cauca, ha traído consigo un aumento considerable en la generación de residuos de construcción y demolición (RCD), los cuales, en su mayoría, son llevados directamente a disposición final sin procesos de separación, tratamiento o aprovechamiento. Esta práctica no sólo limita las oportunidades de sostenibilidad en los proyectos constructivos, sino que también representa un incumplimiento de los lineamientos establecidos por la normativa ambiental vigente. En respuesta a esta problemática, el presente proyecto de grado tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente una propuesta de Plan de Gestión Integral de RCD para un macroproyecto de vivienda de interés prioritario, con el fin de determinar su viabilidad económica y el impacto ambiental asociado.

La metodología desarrollada incluyó un diagnóstico basado en mediciones en campo, análisis gravimétrico y volumétrico de los residuos generados durante la fase de estructura de las viviendas, e identificación de los residuos con mayor potencial de aprovechamiento. A partir de esta caracterización se diseñó un plan de gestión adaptado a las condiciones del proyecto y de la empresa constructora. Posteriormente, se evaluaron tres escenarios económicos: el primero, correspondiente al modelo actual de disposición final del 100% de los residuos; el segundo, basado en la alternativa de aprovechamiento puntual del residuo cerámico limpio (Rb) como sustituto parcial de material granular en las terrazas de cimentación; y el tercero, que consideró la implementación completa del plan de gestión integral junto con estrategias de aprovechamiento interno y externo.

La comparación de los escenarios demostró que, mientras el modelo tradicional implica mayores costos operativos, tanto la alternativa de aprovechamiento puntual como la gestión integral permiten no sólo avanzar significativamente en el cumplimiento de las metas establecidas en la Resolución 1257 de 2021 del MADS, sino también alcanzar beneficios económicos significativos para el proyecto.

## **Abstract**

The accelerated growth of the construction sector in municipalities such as Puerto Tejada, Cauca has led to a considerable increase in the generation of construction and demolition waste (CDW), most of which is directly taken to final disposal without undergoing separation, treatment, or recovery processes. This practice not only limits sustainability opportunities within construction projects but also constitutes non-compliance with the guidelines established by current environmental regulations. In response to this issue, the present master's thesis aimed to technically and economically evaluate a proposed Integrated CDW Management Plan for a large-scale priority interest housing project, in order to determine its economic feasibility and the associated environmental impact.

The developed methodology included a diagnosis based on field measurements, gravimetric and volumetric analysis of the waste generated during the structural phase of the housing units, and identification of the waste types with the greatest recovery potential. Based on this characterization, a management plan was designed and tailored to the conditions of both the project and the construction company. Subsequently, three economic scenarios were evaluated: the first, corresponding to the current model of 100% final disposal of the waste; the second, based on the selective recovery of clean ceramic waste (Rb) as a partial substitute for granular material in foundation terraces; and the third, considered full implementation of the integrated management plan along with both internal and external recovery strategies.

The comparison of these scenarios showed that while the traditional model entails higher operating costs, both the selective recovery alternative and the integrated management approach allow not only for significant progress in meeting the targets established in Resolution 1257 of 2021 issued by the Ministry of Environment and Sustainable Development (MADS), but also for achieving significant economic benefits for the project.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
1.1	Planteamiento del problema .....	7
1.2	Justificación del trabajo de grado .....	9
1.3	Alcance del trabajo de grado .....	10
1.4	Objetivos del proyecto.....	12
1.4.1	Objetivo general .....	12
1.4.2	Objetivos específicos.....	12
1.5	Organización del documento escrito.....	12
<b>2</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	Generación de residuos de construcción a nivel internacional.....	14
2.1.1	Unión Europea.....	14
2.1.2	Brasil.....	18
2.1.3	Chile.....	19
2.1.4	Costa Rica.....	20
2.1.5	Argentina .....	21
2.1.6	Cuba.....	22
2.2	Normativa colombiana para la gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).....	23
2.3	Generación de residuos de construcción a nivel nacional.....	27
2.3.1	Bogotá.....	28
2.3.2	Cali.....	30
2.4	Índices de generación de RCD.....	31
2.4.1	Métodos para la obtención de los indicadores de RCD .....	31
2.5	Estrategias de aprovechamiento de RCD .....	33
2.5.1	Mejora del suelo mediante la sustitución de la mezcla de suelo procedente de residuos de construcción y demolición (RCD) .....	34
2.5.2	Mejoramiento del terreno natural con la incorporación del RCD cerámico	36
2.5.3	Incorporación de RCD a las mezclas de concreto preparado de obra .....	37

2.6	<b>Planes de gestión integral de RCD para vivienda.....</b>	<b>38</b>
2.6.1	Guía para la elaboración del PG de RCD en obra .....	38
2.6.2	Plan de Gestión Integral de RCD, obra 826 Central, en la empresa Jaramillo Mora.....	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>Selección del caso.....</b>	<b>44</b>
3.1.1	Criterios de selección.....	44
3.1.2	Caso potencial.....	44
3.1.3	Recopilación de la información.....	46
3.1.4	Análisis del sitio .....	46
3.1.5	Acceso a la información .....	49
<b>3.2</b>	<b>Caracterización de la generación de RCD en la primera etapa .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3</b>	<b>Caracterización de la generación de RCD en la segunda etapa .....</b>	<b>51</b>
3.3.1	Clasificación de los RCD .....	51
3.3.2	Generación de RCD de la segunda etapa.....	54
3.3.3	Piloto de medición de la segunda etapa.....	55
3.3.4	Masas Unitarias .....	62
3.3.5	Cantidades de obra ejecutadas.....	64
3.3.6	Indicadores de generación .....	64
3.3.7	Indicadores de aprovechamiento .....	67
<b>3.4</b>	<b>Plan de gestión integral de RCD .....</b>	<b>68</b>
3.4.1	Diagnóstico inicial del proyecto.....	68
3.4.2	Caracterización de los RCD .....	68
3.4.3	Diseño de estrategias de gestión.....	69
3.4.4	Indicadores de seguimiento y control.....	69
<b>3.5</b>	<b>Evaluación económica: incorporación del plan de gestión de RCD .....</b>	<b>70</b>
3.5.1	Estrategias de aprovechamiento .....	70
3.5.2	Evaluación económica de la gestión de los RCD.....	71
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD.....</b>	<b>75</b>
<b>4.1</b>	<b>Generación de RCD en la primera etapa .....</b>	<b>75</b>

4.1.1	Diagnóstico de la gestión de los RCD .....	76
4.1.2	Cuantificación de la generación de los RCD .....	77
<b>4.2</b>	<b>Análisis de la generación de la segunda etapa .....</b>	<b>81</b>
4.2.1	Información de generación total para la segunda etapa.....	81
4.2.2	Piloto de medición en campo de la segunda etapa .....	84
4.2.3	Análisis de la generación de la segunda etapa.....	87
4.2.4	Pesos unitarios y peso de la muestra .....	90
4.2.5	Índices de generación gravimétricos (IGR <sup>W</sup> ) y volumétricos (IGR <sup>V</sup> ).....	94
4.2.6	Indicadores de aprovechamiento .....	98
<b>4.3</b>	<b>Plan de gestión integral de RCD .....</b>	<b>102</b>
<b>5</b>	<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA .....</b>	<b>103</b>
<b>5.1</b>	<b>Descripción de los escenarios.....</b>	<b>103</b>
5.1.1	Escenario 1: Gestión actual de RCD .....	104
5.1.2	Propuesta de aprovechamiento: Reemplazo parcial de residuo cerámico en terrazas de cimentación de viviendas. ....	104
5.1.3	Escenario 2: Implementación alternativa de aprovechamiento - Uso de residuo cerámico como reemplazo parcial en la construcción de terrazas de cimentación de las viviendas. ....	107
5.1.4	Escenario 3: Implementación del plan de gestión de RCD con aprovechamiento de residuo cerámico al interior del proyecto. ....	108
<b>5.2</b>	<b>Resultados del análisis económico.....</b>	<b>109</b>
5.2.1	Costos totales del escenario 1: Gestión actual de RCD.....	110
5.2.2	Costos totales del escenario 2: Implementación de la alternativa de aprovechamiento.....	111
5.2.3	Costos totales del escenario 3: Implementación del plan de gestión de RCD con aprovechamiento de residuo cerámico al interior del proyecto. ....	117
<b>5.3</b>	<b>Comparación de los escenarios.....</b>	<b>125</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>128</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>128</b>
<b>6.2</b>	<b>Sugerencias para trabajos futuros .....</b>	<b>130</b>

<b>7</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>132</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>137</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. RCD generado por países de la UE. Tomado de EuroStat (2022).....	17
Tabla 2. Generación de residuos en Brasil .....	18
Tabla 3. Generación de RCD en Argentina. Fuente: Ministerio de ambiente (2020) .....	22
Tabla 4. Línea de tiempo de la Normativa Colombiana para la gestión de RCD.....	26
Tabla 5. Artículo 19 Metas de aprovechamiento, tomado del MADS 2017.....	28
Tabla 6. Cumplimiento de meta de aprovechamiento Resolución 1257 del 2021 (MADS) .	28
Tabla 7. Selección del caso potencial .....	45
Tabla 8. Volumen de RCD retirado en la primera etapa.....	78
Tabla 9. Indicador de generación de RCD por m <sup>2</sup> construido – primera etapa .....	78
Tabla 10. Desperdicios del presupuesto para la primera etapa.....	79
Tabla 11. Volumen de residuos retirados de la segunda etapa .....	81
Tabla 12. Índice de generación de la segunda etapa.....	82
Tabla 13. Desperdicios del presupuesto de la segunda etapa .....	83
Tabla 14. Muestra representativa del piloto de medición.....	85
Tabla 15. Caracterización del volumen de RCD generado en la segunda etapa.....	87
Tabla 16. Descomposición del residuo contaminado .....	88
Tabla 17. Descomposición del volumen de residuos de la segunda etapa. ....	89
Tabla 18. Caracterización del volumen de RCD generado en la primera etapa .....	90
Tabla 19. Descomposición del volumen de residuos generados en la primera etapa. ....	90
Tabla 20. Resumen de las masas unitarias.....	91
Tabla 21. Masas unitarias de la literatura .....	91
Tabla 22. Masa de la muestra representativa de la segunda etapa.....	92

Tabla 23. Masa de los residuos para la segunda etapa.....	93
Tabla 24. Escenario ideal de la segunda etapa.....	93
Tabla 25. Índice de generación volumétrico de la segunda etapa.....	95
Tabla 26. Índice gravimétrico de la segunda etapa del proyecto .....	96
Tabla 27. Comparativo de indicadores de generación.....	96
Tabla 28. Indicador de aprovechamiento de la primera y segunda etapa .....	98
Tabla 29. Indicador de aprovechamiento: primer escenario .....	99
Tabla 30. Indicador de aprovechamiento segundo escenario .....	100
Tabla 31. Estudios de aprovechamiento de Rb.....	108
Tabla 32. APU para los costos asociados de instalar 1 m <sup>3</sup> de Rb generado en obra .....	113
Tabla 33. APU para el ahorro asociado a la instalación de 1m <sup>3</sup> de Rb generado en obra ...	113
Tabla 34. Costos y ahorros generados con la incorporación de la mezcla 80% roca muerta- 20% Rb, escenario 2. ....	114
Tabla 35. Costo disposición final RCD escenario 2. ....	115
Tabla 36. Costos únicos o permanentes de la implementación del plan de gestión de RCD. .....	118
Tabla 37. Costos recurrentes por etapa de la implementación del plan de gestión de RCD. .....	119
Tabla 38. Costos y ahorros generados con la incorporación de la mezcla 80% roca muerta 20% Rb, escenario 3.....	120
Tabla 39. Cantidad de RCD enviado a disposición final y gestores de aprovechamiento proveniente de residuo mezclado.....	121
Tabla 40. Costo de RCD enviado a disposición final escenario 3 .....	122
Tabla 41. Costo de RCD enviado a gestores de aprovechamiento escenario 3. ....	122
Tabla 42. Comparación económica de los escenarios .....	126

Tabla 43. Mediciones del residuo contaminado Rc+Rb+Otros .....	137
Tabla 44. Mediciones de residuo cerámico Rb .....	138
Tabla 45. Mediciones de residuo de concreto Rc .....	138
Tabla 46. Masa unitaria del Rb .....	139
Tabla 47. Masa unitaria del Rc .....	139
Tabla 48. Masa unitaria del Rc+Rb+Otros .....	139
Tabla 49. Masa unitaria del residuo de acero .....	140
Tabla 50. Masa unitaria del residuo de PVC .....	140
Tabla 51. Gestores de RCD en Puerto Tejada .....	167
Tabla 52. Gestores de RCD en el Valle del Cauca .....	168
Tabla 53. Alternativas de aprovechamiento de RCD .....	169
Tabla 54. Estrategias de aprovechamiento de RCD .....	173
Tabla 55. Volumen de Rb aprovechado en la tercera etapa.....	176
Tabla 56. Volumen de Rb requerido para el aprovechamiento .....	179
Tabla 57. Porcentaje proyectado de aprovechamiento de RCD .....	179

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación de residuos por actividad económica .....	15
Figura 2 Principales destinos de los RCD exportados de la UE.....	16
Figura 3. Imagen tomada de la Guía para la elaboración del plan de gestión de RCD en obra. .....	39
Figura 4. Esquema general de la metodología.....	42
Figura 5. Planta arquitectónica de una casa tipo. Fuente: Empresa Constructora .....	47
Figura 6. Distribución del campamento de obra.....	48
Figura 7. Acopios temporales en obra .....	49
Figura 8. Clasificación de RCD (Tomado de: la Resolución 0472 del 2017 MADS).....	52
Figura 9. Formato de cuantificación de RCD .....	58
Figura 10. Formato para cuantificación de volumen de RCD. Fuente: Armijos .....	59
Figura 11. Acopio de la zona de corte de mampostería.....	60
Figura 12. Residuo contaminado .....	61
Figura 13. Masa del recipiente con agua .....	62
Figura 14. Masa de los RCD en el recipiente .....	63
Figura 15. Acopio de residuos en los frentes de las viviendas .....	77
Figura 16. Porcentajes de incidencia de cada categoría del RCD.....	86
Figura 17. Estructura de terrazas de las viviendas.....	105
Figura 18. Estructura de terrazas con la incorporación del Rb.....	107
Figura 19. Ubicación del proyecto.....	147
Figura 20. Clasificación de RCD (Resolución 0472 del 2017 MADS).....	150
Figura 21. Etapas constructivas .....	152
Figura 22. Orden Jerárquico de RCD. Tomado de la Secretaría de ambiente de Bogotá....	153
Figura 23. Valorización de los RCD. Tomado de la Secretaría ambiental de Bogotá.....	154

Figura 24. Acopios temporales por tipo de residuo .....	162
Figura 25. Acopio de residuos .....	163
Figura 26. Estructura de terrazas de las viviendas.....	177
Figura 27. Estructura de terrazas con la incorporación del Rb .....	178

# 1 INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción, a nivel mundial, es uno de los principales motores de desarrollo económico y social. Sin embargo, también es uno de los mayores generadores de impactos ambientales negativos, uno de estos es la producción de residuos de construcción y demolición (RCD). De acuerdo con cifras internacionales, este sector es responsable de al menos el 37% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> equivalente, según (Organización mundial de las naciones unidas, 2023) lo que lo convierte en uno de los más contaminantes y, al mismo tiempo, en un sector clave para la implementación de estrategias sostenibles.

En este contexto, Colombia ha asumido compromisos ambiciosos para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con el objetivo de disminuir en un 51% las emisiones para el año 2030 y alcanzar edificaciones neto cero carbono en 2050 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2021). La adecuada gestión de los RCD es un factor importante para lograr estos objetivos, y la normativa nacional ha establecido requisitos claros para su manejo, como la implementación de planes de gestión integral de RCD a través la Resolución 0472 del 2017 modificada por la Resolución 1257 de 2021 (MADS, 2021) vigente a nivel nacional, y en algunos municipios normativa local, como el Decreto 507 de 2023 de la ciudad de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2023) donde estipula, que, a partir del 01 de enero 2025, será obligatorio un aprovechamiento mínimo del 40% de los RCD generados, excluyendo el material de excavación.

El macroproyecto estudio de caso, ubicado en Puerto Tejada (Cauca), se presenta como un proyecto representativo de la necesidad de integrar la gestión sostenible de los RCD en el desarrollo de vivienda de interés prioritario. Este macroproyecto, que contempla la construcción de más de 1.000 viviendas, enfrenta el desafío de manejar grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición (RCD) en un contexto de alta vulnerabilidad social y económica. En este sentido, la implementación de un plan de gestión integral de RCD no sólo responde a una obligación normativa, sino que se plantea como una oportunidad para reducir costos, mejorar la sostenibilidad del proyecto y contribuir al bienestar de la comunidad local.

Este trabajo de grado tiene como objetivo evaluar técnica y económicamente una propuesta de plan de gestión integral de RCD para el macroproyecto estudio de caso. Para ello, se realizará un análisis detallado de las prácticas actuales de disposición de residuos, se propondrán alternativas

de reutilización y reciclaje, y se evaluarán los costos y beneficios asociados a la implementación del plan en comparación con el modelo actual. Al abordar este estudio, se busca no sólo cumplir con las exigencias regulatorias, sino también generar un impacto positivo en la sostenibilidad del sector de la construcción en Colombia, demostrando que la gestión eficiente de los residuos puede convertirse en una ventaja competitiva para las empresas constructoras.

## **1.1 Planteamiento del problema**

El municipio de Puerto Tejada (Cauca) enfrenta desafíos en la gestión de residuos sólidos, dentro de los cuales se incluyen los residuos de construcción y demolición (RCD). Actualmente, la disposición de estos residuos carece de un manejo adecuado, ya que son transportados a sitios no autorizados que no cumplen con los requisitos técnicos ni ambientales necesarios para su almacenamiento y tratamiento. La ausencia de una normativa específica para el municipio, junto con la falta de políticas de incentivos para la correcta gestión de los RCD, ha propiciado un deterioro ambiental progresivo, aumentando los riesgos de contaminación del suelo, del agua y afectando la calidad del aire. Este contexto no solo genera un impacto negativo, sino que también representa una amenaza para la salud pública, debido a la proliferación de residuos en espacios inadecuados.

Puerto Tejada experimenta actualmente un rápido crecimiento de infraestructura, impulsado por la llegada de diversas constructoras del Valle del Cauca, que han apostado por el desarrollo de macroproyectos de vivienda VIP en la zona. Este incremento constructivo, si bien representa una oportunidad para el desarrollo urbano, también conlleva un incremento exponencial en la generación de RCD, lo que agrava la problemática de disposición inadecuada en sitios de disposición final no autorizados. La falta de estrategias eficientes para el manejo de estos residuos intensifica la contaminación ambiental, aumentando las emisiones de CO<sub>2</sub> y promoviendo el uso desmedido de recursos naturales, lo que refuerza la necesidad de adoptar prácticas sostenibles en el sector de la construcción.

En este contexto, la gestión eficiente de RCD cobra especial relevancia, dado su impacto en las emisiones y en el uso de recursos. Las empresas constructoras deben implementar estrategias efectivas para minimizar estos impactos, y un plan integral de gestión de RCD es una herramienta fundamental para avanzar hacia la sostenibilidad en el sector (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2023).

El macroproyecto objeto de estudio abarca más de 5000 unidades de vivienda, construidas bajo el sistema de mampostería estructural, con viviendas VIP cuya área no supera los 42 m<sup>2</sup>. Su desarrollo incluye obras de urbanismo complementarios, tales como vías, parques y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Se ha identificado que toda la gestión de RCD del proyecto se basa únicamente en su disposición final, sin la incorporación de prácticas de reutilización, reciclaje o reducción de residuos, lo que representa una oportunidad clara de mejora en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa.

La empresa constructora enfrenta múltiples desafíos para implementar una gestión eficiente de estos residuos, actualmente se desconocen las metas de aprovechamiento de RCD que debe cumplir el proyecto al momento de su finalización, así como las implicaciones normativas que regulan la gestión de residuos. También, carece de personal capacitado en la formulación y ejecución de un plan de gestión de RCD, lo que dificulta el cumplimiento de la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). De acuerdo con esta normativa, en su Artículo 19, el macroproyecto debe cumplir con un meta de aprovechamiento del 20% del total de RCD generados, dado que Puerto Tejada es un municipio de sexta categoría, conforme a la clasificación establecida en la Ley 617 de 2000, modificada posteriormente por la Ley 1551 de 2012.

A la fecha las prácticas han estado orientadas a la disposición tradicional en sitios de disposición final, lo que ha resultado en un aumento de los costos operativos y un mayor impacto ambiental. Además, no se ha realizado una eficiente cuantificación del volumen de RCD ni una evaluación de los costos asociados a su gestión para las diferentes etapas del proyecto.

La falta de estrategias claras y conocimiento especializado ha dificultado la implementación de un plan de gestión integral de RCD que permita aprovechar los residuos mediante su reducción, reutilización o reciclaje. Esto ha generado una percepción limitada sobre las oportunidades económicas que un plan bien estructurado podría brindar, incluyendo la reducción de costos operativos y el posible uso de materiales reciclados en futuras etapas del proyecto. Tampoco se ha evaluado de manera rigurosa la viabilidad técnica y económica de un plan de gestión frente al modelo actual de disposición de residuos. La ausencia de estos análisis impide demostrar con claridad si la implementación de estrategias de aprovechamiento podría representar una ventaja

competitiva y sostenible para la empresa constructora, optimizando costos y contribuyendo a la reducción del impacto ambiental del macroproyecto.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y realizando una evaluación de la empresa frente a las políticas sostenibles que pasaran de ser una oportunidad de aprovechamiento para convertirse en una obligación para los grandes generadores, se plantea la pregunta de investigación:

¿Cómo un plan de gestión integral de RCD impacta técnica y económicamente un macroproyecto de vivienda de interés prioritario?

## **1.2 Justificación del trabajo de grado**

La creciente necesidad de desarrollar estrategias sostenibles para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Colombia, en un contexto de rápido crecimiento urbano, expansión de proyectos de vivienda y escasez de recursos naturales, exige que las empresas constructoras adopten prácticas alineadas con los principios de la economía circular. Esto no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también optimiza los costos operativos de los proyectos, ofreciendo beneficios tanto económicos como sociales.

El sector de la construcción en Colombia es responsable de una gran cantidad de residuos sólidos, especialmente RCD, que a menudo se disponen en vertederos sin medidas adecuadas de control, generando problemas de contaminación del suelo, agua y aire, así como riesgos a la salud pública. Esta situación ha motivado la implementación de normativas como la Resolución 1257 de 2021 (MADS, 2021) que establece la obligatoriedad de un aprovechamiento mínimo del 40% de los RCD generados a partir del año 2024 hasta el año 2030. En este sentido, la incorporación de un plan de gestión integral de RCD no solo es un imperativo regulatorio, sino una oportunidad para que las empresas construyan un modelo de negocio más eficiente y responsable, reduciendo costos a través del reciclaje y la reutilización de materiales.

Este trabajo de grado tiene como propósito evaluar la viabilidad económica y técnica de la implementación de un plan de gestión integral de RCD para un macroproyecto de vivienda de interés prioritario. La empresa constructora enfrenta el reto de cumplir con las exigencias normativas y, al mismo tiempo, reducir su huella ambiental. El desarrollo del plan permitirá identificar los beneficios económicos asociados, como la disminución de costos por disposición final y el aprovechamiento de RCD, además de su contribución a la sostenibilidad del proyecto.

La relevancia del estudio se refuerza por los múltiples beneficios que se prevé obtener. En primer lugar, el aprovechamiento de los RCD disminuirá la demanda de materias primas como agregados pétreos y cemento, y reducirá el volumen de residuos enviados a disposición final, aliviando así la presión sobre los sitios de disposición final. En segundo lugar, la evaluación técnica permitirá identificar materiales viables para ser reutilizados en etapas posteriores del proyecto, lo que contribuirá a optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia del proceso constructivo. Además, se analizará el comportamiento de los costos operativos y los ahorros potenciales derivados de la eliminación de actividades costosas, como la disposición de residuos.

Este plan de gestión no solo es relevante para el proyecto específico de interés prioritario en Puerto Tejada (Cauca), sino que puede servir como modelo de referencia para futuros desarrollos inmobiliarios en Colombia y en contextos similares. El enfoque en la economía circular y la sostenibilidad también contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 12 (producción y consumo responsables) y el ODS 13 (acción por el clima), apoyando los compromisos internacionales del país en materia de reducción de emisiones y preservación de recursos.

En conclusión, este trabajo de grado está plenamente justificado por la necesidad de mejorar la gestión de residuos en el sector de la construcción en Colombia, especialmente en proyectos de gran escala como los de vivienda de interés prioritario. A través de un análisis técnico y económico de un plan de gestión integral de RCD, no solo se busca cumplir con las regulaciones ambientales vigentes, sino también demostrar que una gestión adecuada de los residuos puede generar ahorros operativos, mejorar la competitividad de las empresas y contribuir al desarrollo sostenible del país.

### **1.3 Alcance del trabajo de grado**

Para responder a la pregunta de investigación que dio origen a este proyecto de grado, fue necesario delimitar su alcance dentro de un marco normativo, técnico y operativo específico. En primera instancia, se adoptó como eje orientador la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual establece los lineamientos que deben cumplir los grandes generadores para garantizar una adecuada gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD). Esta normativa no solo sirvió de base para la estructuración del plan de gestión, sino que

también definió el marco regulatorio sobre el cual se fundamentaron los criterios técnicos y económicos de evaluación.

El estudio se centró en un caso específico: un macroproyecto de vivienda de interés prioritario, construido mediante sistema en mampostería estructural por una empresa del suroccidente colombiano. Gracias a su ubicación geográfica, se logró realizar un seguimiento técnico quincenal durante la fase de estructura, permitiendo caracterizar en detalle la generación y manejo de los RCD. No obstante, se reconocieron varias limitaciones estructurales, entre ellas: el desconocimiento normativo por parte de la empresa constructora, la ausencia de personal capacitado para liderar procesos ambientales en obra, y la falta de estrategias de separación en la fuente o aprovechamiento de residuos.

Ante este panorama, el plan de gestión fue diseñado no solo para cumplir con las disposiciones legales, sino también para adaptarse a las capacidades técnicas y económicas reales de la empresa, con el fin de viabilizar su implementación. Aunque esta implementación no formó parte del alcance del proyecto por ser una decisión interna de la organización, sí se desarrolló una evaluación económica comparativa entre dos escenarios: uno que refleja las prácticas actuales de disposición final sin aprovechamiento, y otro que incorpora progresivamente el plan de gestión junto con estrategias específicas para el aprovechamiento de los RCD. Esta comparación busca demostrar no solo la viabilidad técnica, sino también los beneficios económicos que se derivan de una gestión sostenible de los residuos en obra. Adicionalmente, se proyectó que el plan propuesto sea replicable en otros proyectos de características similares desarrollados por la empresa, permitiendo escalar sus impactos en términos de sostenibilidad ambiental y eficiencia operativa dentro del sector.

Este proyecto no solo representa una respuesta técnica al problema de la gestión de los RCD, sino también una invitación a transformar la cultura organizacional hacia la sostenibilidad, demostrando que el cumplimiento normativo y la rentabilidad económica no son excluyentes, sino que pueden integrarse en una visión responsable y eficiente.

## **1.4 Objetivos del proyecto**

### 1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta de plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) para un macroproyecto de vivienda de interés prioritario, con el fin de determinar la viabilidad económica.

### 1.4.2 Objetivos específicos

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Diagnosticar el estado actual de las estrategias de generación, aprovechamiento y disposición final de RCD implementadas por la empresa constructora en el macroproyecto estudio de caso.
- Diseñar un plan de gestión integral de RCD teniendo en cuenta las particularidades del macroproyecto de vivienda y de la empresa constructora.
- Evaluar económicamente la propuesta de plan de gestión integral de RCD para viabilizar su implementación en el estudio de caso.

## **1.5 Organización del documento escrito**

El presente documento estará estructurado en cinco capítulos, los cuales permiten desarrollar de manera clara y detallada los aspectos fundamentales del proyecto de grado.

En el primer capítulo se abordará la problemática que dio origen al proyecto de grado, presentando un panorama transparente sobre el impacto ambiental de los RCD en Colombia y la creciente necesidad de implementar estrategias sostenibles, se expondrá el panorama actual del manejo de los RCD en el país, destacando los índices de generación y contaminación, con el fin de generar una comprensión clara de la situación actual y del contexto en el que se desarrolla el proyecto.

El segundo capítulo se enfocará en presentar información relevante sobre el manejo, tratamiento y disposición de los RCD a nivel global, yendo desde una perspectiva internacional, nacional y local. Se revisarán estudios, artículos e investigaciones de diferentes países, proporcionando índices de

generación y aprovechamiento de RCD, lo cual será fundamental para realizar la comparación con los datos obtenidos en campo.

En el capítulo tres se explicará la metodología empleada en el proyecto para posteriormente analizar los datos obtenidos en campo en el capítulo cuatro, calculando los índices de generación de residuos y comparándolos con los índices encontrados en la literatura revisada en el capítulo 2, con el fin de establecer una línea base para los índices de generación en proyectos de construcción de vivienda en sistema de mampostería estructural.

Para complementar el capítulo cuatro se estructurará el plan de gestión integral de RCD para la empresa constructora, alineando las alternativas de aprovechamiento planteadas en el capítulo dos con las capacidades de la empresa y las necesidades del proyecto de estudio de caso. Este plan será diseñado con el objetivo de cumplir con la normativa vigente y promover un aprovechamiento eficiente de los residuos para posiblemente obtener beneficios económicos para la empresa constructora y al mismo tiempo, contribuir a minorar el impacto ambiental por parte del sector constructor.

Se concluirá el capítulo cuatro con la realización de la evaluación económica de dos escenarios: el primero será basado en los costos y beneficios de una posible implementación del plan de gestión integral de RCD y el segundo escenario será la evaluación de los costos asociados por mantener la gestión actual de residuos, que implica la disposición final sin aprovechamiento.

Para cerrar con el capítulo cinco donde se con las conclusiones del proyecto, basadas en los análisis de los datos obtenidos en campo y la evaluación económica de los escenarios. También se ofrecerán recomendaciones para la empresa constructora.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión de la bibliografía se presentará en cuatro grandes partes, la primera será la revisión de los indicadores de generación de RCD desde la perspectiva internacional, la segunda parte será desde la visión nacional, se continuará con una revisión la normativa para la gestión de los RCD y finalmente, se revisará la bibliografía referente a los planes de gestión integral de RCD que se han desarrollado para la construcción de viviendas.

### 2.1 Generación de residuos de construcción a nivel internacional

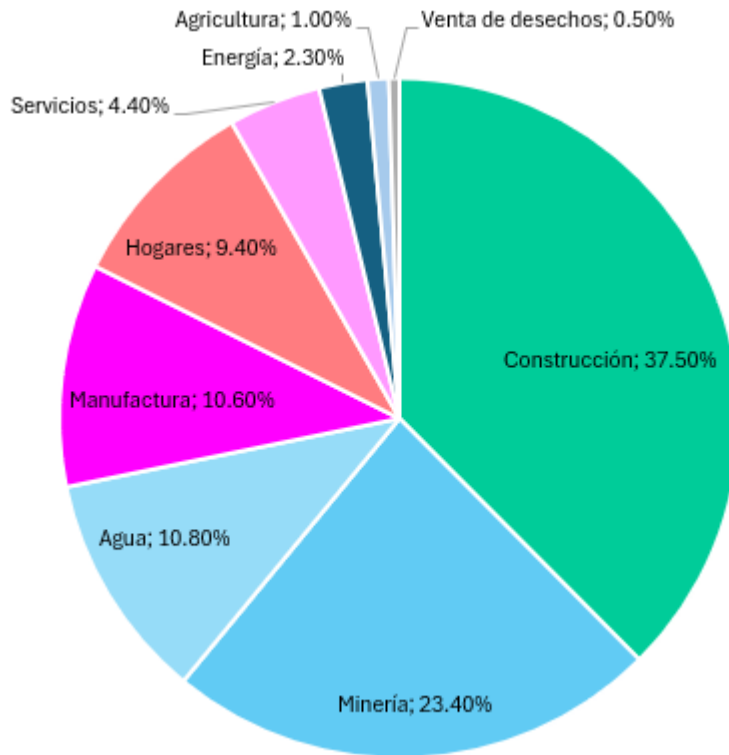
En primera medida es importante definir qué se entiende por residuo, un residuo es cualquier objeto, material o elemento que resulta de una actividad, ya sea de origen comercial, doméstico o industrial, y que el generador decide abandonar o entregar, siendo este susceptible de aprovechamiento si posee las características adecuadas para integrarse en un nuevo proceso productivo (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2002). Los residuos pueden clasificarse en aprovechables o no aprovechables en función de su origen y propiedades

Dentro de este marco, los residuos de construcción y demolición (RCD) son aquellos que provienen específicamente de actividades del sector de la construcción, como las demoliciones, remodelaciones y excavaciones, que generan grandes volúmenes de escombros, metales, plásticos, madera, y otros materiales. Estos residuos, en su mayoría, tienen el potencial de ser reutilizados o reciclados para incorporarse en nuevos procesos, como la fabricación de agregados reciclados o su uso en rellenos estructurales, contribuyendo así a la sostenibilidad del sector (MADS, 2020)

#### 2.1.1 Unión Europea

En la Unión Europea, los residuos de construcción y demolición (RCD) representan el 37.5% de la generación total de residuos, tal como se ilustra en la Figura 1, convirtiéndose en la mayor fuente de residuos en la región, seguida por el sector de la minería y canteras con un 23.4% (EuroStat, 2020). Este elevado porcentaje refleja la importancia que el sector de la construcción tiene en la generación de desechos, lo que ha llevado a la UE a priorizar la gestión de estos residuos en su agenda ambiental.

Para mitigar el impacto ambiental del sector de la construcción, la unión europea ha implementado medidas dentro del marco de la economía circular y la Directiva Marco de Residuos, que establece un objetivo de reciclaje del 70% de los RCD para los Estados miembros. Estas estrategias buscan reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos, fomentar el reciclaje de materiales de construcción, y promover la reutilización de recursos, minimizando así la huella ambiental del sector.



*Figura 1. Generación de residuos por actividad económica*

Países como Finlandia, Bulgaria, Suiza, Luxemburgo, Estonia y Austria generan entre 5 y 20 toneladas per cápita de residuos minerales importantes, una categoría que incluye principalmente los RCD. Con una población de 443.4 millones de habitantes en la Unión Europea, se estima que se generan aproximadamente 800 millones de toneladas de RCD al año (Parlamento Europeo, 2024)

Para el año 2020, el 59.1% de estos residuos pasó por operaciones de tratamiento y recuperación. De este total, 39.9% fueron reciclados, mientras que un 12.7% se utilizó en rellenos. Sin embargo, 47.4% de los residuos aún fueron depositados en vertederos, lo que plantea el mayor desafío

ambiental para la UE (Parlamento Europeo, 2024). El objetivo es reducir este porcentaje a 0%, fomentando la economía circular y minimizando el impacto ambiental de la disposición final.

Otra práctica relevante es la exportación de residuos. En 2022, la UE exportó 32.1 millones de toneladas de residuos, de los cuales 55% eran chatarra de hierro y acero que se destinó principalmente a Turquía, mientras que el 15% correspondió a papel, mayormente exportado a India, como se evidencia en la Figura 2:

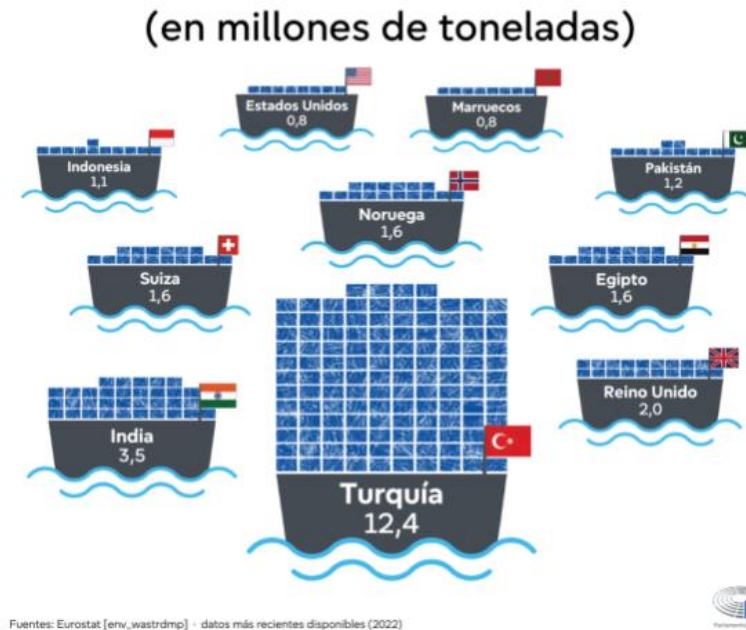


Figura 2 Principales destinos de los RCD exportados de la UE.

La comisión europea del medio ambiente expone información sobre la generación de residuos de construcción y demolición en los diferentes países de la unión europea, los cuales se pueden visualizar en la Tabla 1:

<b>País</b>	<b>RCD en millones de toneladas (Año)</b>	<b>% Reutilizado</b>	<b>% Vertido</b>
Finlandia	1	45.00%	55.00%
Suecia	2	21.00%	79.00%
Austria	5	41.00%	59.00%
Alemania	59	17.00%	83.00%
Reino Unido	30	45.00%	55.00%
Francia	24	15.00%	85.00%
Italia	20	9.00%	91.00%
España	13	<5	>95
Holanda	11	90.00%	10.00%
Portugal	3	<5	>95
Dinamarca	3	81.00%	19.00%

*Tabla 1. RCD generado por países de la UE. Tomado de EuroStat (2022)*

En la Tabla 1 se puede visualizar que el vertimiento continúa siendo la práctica más concurrente en los diferentes países y es aquí donde se deben enfocar los mayores esfuerzos.

En el año 2017, la Unión Europea presentó el Protocolo para la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), con el objetivo de promover la economía circular y un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción. Este protocolo estableció directrices clave, como las Directivas sobre Incineración, Vertimientos y Normas de Reciclado, y fijó el objetivo de alcanzar al menos un 70% de reciclaje de RCD para el año 2020 (Wolff, 2017). Para lograrlo, se propusieron medidas como la separación en la fuente, la mejora en la trazabilidad de los residuos, la promoción de protocolos de gestión de RCD y la optimización de las prácticas de reciclado.

En 2021, el Parlamento Europeo aprobó un plan de acción más avanzado para consolidar la economía circular, exigiendo medidas adicionales para avanzar hacia una economía neto cero carbono. El objetivo principal es que, para el año 2035, la economía de la Unión Europea sea completamente circular, alineándose con los objetivos del Pacto Verde Europeo, que establece la neutralidad climática para 2050. Este marco refuerza el compromiso de la UE en reducir los impactos ambientales del sector de la construcción, avanzando hacia una economía sostenible.

### 2.1.2 Brasil

Este país produjo en promedio 48 millones de toneladas de RCD en el año 2021, es decir, que se tiene un promedio por habitante de 227 Kg de residuos. Teniendo en cuenta las estadísticas de la Asociación Brasileña de Empresas de Limpieza Pública y Residuos Especiales, la cantidad de residuos generados durante el año 2021 fue 2.9% mayor en comparación con el año 2020.

También es importante saber que de acuerdo con la información reunida por Leite, quién compiló los datos de seis autores quienes registraron información sobre el número de habitantes por ciudad y la generación de residuos en toneladas por día, se obtuvo la siguiente información de la Tabla 2:

<b>Ciudad / Municipio</b>	<b>Población (Mill de hab)</b>	<b>Generación diaria (Ton / día)</b>
San Pablo	15	17240
Porto Alegre	1.2	350
Salvador	2.2	1700
Reiverao Petro	0.46	1043
San José de Rio Negro	0.32	687
Jundiai	0.29	712
Santo André	0.63	1013
Victoria	2.01	1200
Belo Horizonte	0.24	310
San José de los campos	0.5	733
Florianapolis	0.5	0

*Tabla 2. Generación de residuos en Brasil*

La generación de residuos en Brasil de acuerdo con Favaretto (2017) cuenta con una clasificación que de acuerdo con la CONAMA 307 se clasifican los RCD en 4 categorías. La categoría A contiene los residuos reusables y reciclables producidos por la construcción, demolición y remodelación. La categoría B contiene residuos como plástico, papel, cartón, vidrio y madera. La categoría C son aquellos residuos que no pueden ser reciclados y deben ser llevados a un lugar específico para disposición final y finalmente, la categoría D son residuos peligrosos que pueden estar contaminados con petróleo, solventes y pinturas.

La Resolución CONAMA 307 establece directrices y procedimientos para la gestión de los RCD en Brasil, buscando minimizar el impacto ambiental generado por el sector de la construcción. Esta normativa regula las acciones de los gobiernos municipales, empresas constructoras y otros actores involucrados en la generación y disposición de RCD. Uno de los pilares de la resolución es la creación de un Plan Municipal de Gestión de Residuos de Construcción, que debe incentivar la re inserción de residuos reciclables o reutilizables en el ciclo productivo, promoviendo la economía circular.

Además, la resolución destaca la importancia de las acciones educativas para concientizar a los generadores de residuos sobre la minimización de su producción. Estas acciones buscan no sólo cumplir con los objetivos de sostenibilidad, sino también fomentar prácticas responsables desde la fase de planificación hasta la ejecución de los proyectos de construcción, contribuyendo así a la reducción del volumen de RCD y su impacto negativo en el medio ambiente.

### 2.1.3 Chile

De acuerdo con el Instituto de la Construcción de Chile (2023), el país genera alrededor de 7.2 millones de toneladas RCD anualmente. Aunque este valor es significativamente menor que los 1,130 millones de toneladas generadas por China, de acuerdo con la información presentada por Lu (2021), Chile enfrenta un desafío particular: el factor de generación de residuos por metro cuadrado construido es el doble que en otros países. Este elevado índice no sólo aumenta el impacto ambiental, sino que también pone en evidencia las ineficiencias productivas en el sector de la construcción en el país.

Las prácticas predominantes en Chile consisten en la disposición final de RCD en vertederos no diseñados para este tipo de residuos, lo que ocasiona daños en las impermeabilizaciones y una reducción en la vida útil de estas infraestructuras. A finales de 2023, se identificaron al menos 3,735 sitios de disposición final no autorizados, y se ha observado un incremento del 25% en estos lugares. Ante este problema, la hoja de ruta del país para un Chile Circular 2040 establece como objetivo la reducción del 90% de estos sitios no autorizados, impulsando la necesidad de nuevas normativas, incentivos y un seguimiento riguroso (Corporación de fomento de la producción, 2020)

Actualmente, la contribución económica del sector de la construcción en Chile se basa en una economía lineal, donde se extraen recursos, se fabrican productos, se construye y se desecha (MMA, 2020). Sin embargo, para alinearse con los objetivos de sostenibilidad, Chile debe migrar hacia una economía circular, que se fundamenta en tres principios clave:

1. Eliminar la contaminación y los residuos desde el diseño.
2. Mantener los productos y materiales en uso.
3. Regenerar los sistemas naturales.

Esta transición no sólo reducirá el impacto ambiental, sino que también optimizará el uso de recursos y mejorará la productividad del sector constructor en Chile.

#### 2.1.4 Costa Rica

Según la Guía de manejo de escombros y otros residuos, elaborado por la UICN (2022), se estima que en Costa Rica se producen al menos 1800 toneladas diarias de RCD, donde al menos más del 50% es reciclable, a razón de esta situación es natural observar que las disposiciones de los residuos se realizan en vertederos no autorizados y esto conlleva a la obstrucción de vías, ríos, terrenos y al mismo tiempo se genera una afectación directa e indirecta a la salud humana, también se resalta que la separación en el origen de los residuos es completamente nula y esto propicia la mala práctica del uso de botaderos ilegales.

Los residuos se caracterizan por estar constituidos por residuos de concreto, asfaltos, cerámicos, tierra y barro y estos representan por lo menos el 50% de la generación total de residuos, aproximadamente entre un 20% - 30% son maderas y el porcentaje restante que oscila nuevamente entre el 20%-30% son desperdicios misceláneos tales como metales, vidrios, asbestos, etc. Fernández (2020)

Para el año 2010 comenzó a regir la ley “Gestión integral de los residuos de Costa Rica” que indica que toda obra o actividad que procese almacene, elimine, recupere o disponga residuos ordinarios y peligrosos deberá dar cumplimiento con el trámite de evaluación del impacto ambiental para obtener la licencia de construcción.

Para fortalecer y reglamentar el cumplimiento del plan de gestión integral de residuos, en el año 2012 se expide la ley 8839 con el fin de asegurar el trabajo articulado en la gestión integral de

residuos para prevenir riesgos sanitarios y promover y proteger la calidad ambiental, Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica (2010).

### 2.1.5 Argentina

Los residuos sólidos provenientes de los RCD representan al menos el 30% del volumen total generado y la mayor generación proviene de los grandes polos urbanos, sin embargo, el 90% de los municipios del país no cuentan con una regulación estable y sólida para la adecuada gestión de estos residuos (Fundación Hanns Seidel, 2020).

Una ciudad como Buenos Aires presenta indicadores de generación de RCD de aproximadamente un tercio del volumen total generado, a razón de esto cuentan con una planta de tratamiento de residuos áridos donde los RCD son transformados en materiales que pueden ser reutilizados en nuevas obras de estructuras u obras viales, como también en capas de rellenos sanitarios. Para el año 2020 reciclan hasta 2,400 toneladas diarias de las cuales el 90% son RCD, esto corresponde al 32.9% del volumen total generado diariamente de residuos (7,300 toneladas) (Fundación Hanns Seidel, 2020).

A la fecha no se cuenta con una legislación debidamente establecida para la regulación, control y tratamiento de los residuos, sin embargo, existe la Ley nacional 24.051 que establece las disposiciones para la generación, manipulación y disposición de residuos peligrosos en lugares sometidos a la jurisdicción nacional (COFEMA, 1992), pero cabe resaltar que es una ley que se expidió el 17 de enero de 1992, es decir, que su nivel de impacto a la sociedad no se encuentra en la escala que hoy se debería estar dadas las obligaciones que tienen los países con el medio ambiente.

En Argentina las únicas estadísticas disponibles sobre la generación de residuos de RCD provienen del observatorio nacional para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos, sin embargo, se resalta que en sus valores reportados no se tiene en cuenta la información de entregada por el sector de las volquetas debido a que se considera un sector informal (Consorcio GIRSU, 2022).

El Ministerio de ambiente (2020) entregó la siguiente información consignada en la Tabla 3:

<b>Mes de operación</b>	<b>Residuos recibidos (Kg)</b>	<b>Residuos con material clasificado (Kg)</b>	<b>Residuos recuperados (Kg)</b>	<b>% Material recuperado</b>
ene-22	5541.31	2728.90	102.028	3.7%
feb-22	4779.06	2455.82	138.977	5.7%
mar-22	5117.98	3011.52	116.652	3.9%
abr-22	4596.9	2567.04	121.846	4.7%
may-22	4649.41	2721.84	127.953	4.7%
jun-22	4439.4	2541.22	116.425	4.6%
jul-22	4459.4	2558.77	133.007	5.2%
ago-22	4971.3	2930.96	142.640	4.9%
sep-22	4837.04	2780.00	125.979	4.5%
oct-22	4685.6	2674.86	127.301	4.8%
nov-22	4737	2695.58	123.608	4.6%
dic-22	5095.3	2372.28	90.454	3.8%

*Tabla 3. Generación de RCD en Argentina. Fuente: Ministerio de ambiente (2020)*

Durante el año 2022 se generaron al menos 5,000 toneladas mensuales de residuos y aproximadamente 2,500 toneladas mensuales corresponden a materiales que pueden ser clasificados para ser transformados, del volumen total generado al año que corresponde a 57,000 toneladas se logra recuperar entre el 4% - 5% (GIRSU, 2022).

### 2.1.6 Cuba

En este país la gestión de residuos enfrenta un desafío importante debido a que se generan al menos 7,382 m<sup>3</sup> al año de solamente RCD (Inter Press Service, 2023), se sabe que para el año 2013 en la Habana se producían al menos 1,200 m<sup>3</sup> de estos residuos (Rivas, 2015), es decir, que 10 años después se ha tenido un aumento del 600%.

Actualmente Cuba no cuenta con la infraestructura necesaria para realizar la categorización de los materiales reciclables, los potencialmente reciclables y los desechos, por ende, todos los residuos sin importar su categoría van hacia un mismo vertedero y este país se categoriza por tener una economía lineal, sin embargo, tienen como reto migrar hacia la economía circular desde la gestión de los residuos en donde se logre aprovechar al máximo cada material, a la fecha solo se logra recuperar el menos el 11% del total de los residuos (Marin, 2024).

Con respecto a la normativa, Cuba cuenta con la ley 1288 de materias primas que se encuentra vigente desde el año 1975 y establece que los organismos y demás dependencias del estado tienen la obligación de recolectar los residuos sólidos aprovechables y no aprovechables, sin embargo, su impacto no ha sido significativo teniendo en cuenta los objetivos sostenibles a nivel mundial, se espera que para el año 2025 se apruebe un decreto de ley sobre el reciclaje que tendrá más regulaciones y estará alineado con la sostenibilidad y economía circular (AMEC, 2024).

## 2.2 Normativa colombiana para la gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

La gestión de RCD en Colombia ha experimentado una evolución significativa a lo largo del tiempo, impulsada por la formulación y actualización de diversas normas y regulaciones. Desde las primeras disposiciones en las décadas de los años 70 y 90, que marcaron el inicio de la regulación en este ámbito, hasta las resoluciones más recientes, el país ha consolidado un marco legal orientado a minimizar los impactos ambientales de la construcción y a promover prácticas sostenibles en el manejo de estos residuos.

La siguiente línea de tiempo ilustrada en la Tabla 4, presenta la normatividad más relevante, destacando los avances en la regulación, el establecimiento de metas de aprovechamiento, la implementación de estrategias de economía circular y la mejora en los mecanismos de trazabilidad y control. Comprender esta evolución normativa es fundamental para identificar los retos y oportunidades en la gestión de RCD y su impacto en la planificación urbana y el desarrollo sostenible.

Normativa	Año	Descripción
Ley 2811 de 1974	1974	Código Nacional de Recursos Naturales y Protección del Medio Ambiente. Establece los principios fundamentales de la gestión ambiental en Colombia, regulando el uso de los recursos naturales y promoviendo su conservación y aprovechamiento racional.
Ley 9 de 1979	1979	Reglamenta medidas de salud pública y control de contaminación. Fija normas para el manejo de residuos peligrosos y establece sanciones por contaminación ambiental.

<b>Normativa</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción</b>
Resolución 541 de 1994 - Medellín	1994	Normativa local que regula el transporte, almacenamiento y disposición final de escombros y materiales de construcción en Medellín, con el fin de evitar impactos negativos en el espacio público y el medio ambiente.
Ley 142 de 1994	1994	Organiza los servicios públicos domiciliarios, asegurando la prestación eficiente y regulada de la recolección y disposición de residuos sólidos en el país, incluyendo la gestión de escombros y desechos de construcción.
Ley 388 de 1997	1997	Orienta el ordenamiento territorial en Colombia, estableciendo lineamientos para el uso del suelo y promoviendo el desarrollo sostenible en las ciudades, con enfoque en la adecuada planificación de residuos.
Acuerdo Metropolitano 15 de 2006 - Valle de Aburrá	2006	Busca fomentar la planificación ambiental sostenible en el Valle de Aburrá, regulando la gestión de residuos sólidos y promoviendo prácticas de aprovechamiento y valorización de los RCD.
Resolución 0879 de 2007	2007	Regula la gestión de residuos sólidos en el Valle de Aburrá, estableciendo lineamientos específicos para su recolección, transporte y tratamiento, incluyendo medidas para la adecuada disposición de escombros.
Ley 1252 de 2008	2008	Prohíbe el manejo inadecuado de residuos peligrosos en Colombia, estableciendo medidas de control y sanciones para evitar la contaminación del suelo y las fuentes hídricas.
Ley 1523 de 2012	2012	Crea el marco nacional para la gestión del riesgo en Colombia, incluyendo desastres asociados a la mala gestión de residuos sólidos y escombros en espacios urbanos y rurales.
Resolución 1115 de 2012 - Bogotá	2012	Establece lineamientos técnicos y ambientales para el tratamiento y aprovechamiento de los RCD en Bogotá, promoviendo el uso de agregados reciclados en la construcción.

<b>Normativa</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción</b>
Decreto 1609 de 2013 - Medellín	2013	Regula el transporte de escombros y materiales de construcción en Medellín, fijando sanciones para la disposición inadecuada de estos residuos en el espacio público.
Resolución 1138 de 2013	2013	Reglamenta la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá, estableciendo requisitos para su manejo y aprovechamiento. Busca reducir su impacto ambiental y fomentar el reciclaje y reutilización en la construcción.
Resolución 932 de 2015 - Bogotá	2015	Modifica y complementa la Resolución 1115 de 2012, estableciendo procedimientos para la inscripción y reporte de datos por parte de los generadores de RCD en Bogotá.
Decreto 1077 de 2015 - Nacional	2015	Consolida la normativa sobre la gestión integral de residuos sólidos en Colombia, exigiendo que los generadores de RCD formulen e implementen un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS).
Decreto 586 de 2015	2015	Establece lineamientos para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá, promoviendo prácticas sostenibles. Define responsabilidades para generadores, transportadores y operadores, además de normativas sobre disposición de escombros, permisos y medidas para mitigar el impacto ambiental.
Resolución 0472 de 2017 - Nacional	2017	Establece directrices nacionales para la gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD), promoviendo la reducción en la fuente, la reutilización de materiales y la implementación de tecnologías limpias en su tratamiento. Además, define las responsabilidades de los generadores, transportadores y gestores de residuos, establece metas de aprovechamiento y fomenta la creación de infraestructuras para el reciclaje y valorización de estos residuos, contribuyendo a la transición hacia una economía circular en el sector de la construcción.

<b>Normativa</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción</b>
Decreto 0771 de 2018 - Cali	2018	Regula la gestión de RCD en Cali, estableciendo metas progresivas para el aprovechamiento de estos residuos y promoviendo la inscripción de generadores ante la autoridad ambiental local.
Resolución 1257 de 2021 - Nacional	2021	La Resolución 1257 de 2021 modifica y complementa la Resolución 0472 de 2017, introduciendo nuevos términos y definiciones relacionados con la gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), como los sitios de aprovechamiento y tratamiento de RCD. Además, establece medidas más estrictas para mejorar la trazabilidad, control y seguimiento en el manejo de estos residuos, con el objetivo de fomentar su adecuada disposición, reutilización y aprovechamiento, en línea con los principios de economía circular y desarrollo sostenible. Asimismo, modifica las metas de aprovechamiento de los RCD, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible en el sector de la construcción.
Acuerdo 0574 de 2023 - Cali	2023	Aprueba el Manual de Construcción Sostenible en Cali, estableciendo incentivos para proyectos que implementen prácticas sostenibles, incluyendo el uso de materiales reciclados en la edificación.
Sello Cali Construye Sostenible	2023	Certificación ambiental en Cali que incentiva prácticas sostenibles en la construcción a nivel local. Promueve el uso eficiente de recursos, la reducción de residuos y la implementación de estrategias de economía circular en los proyectos. Además, ofrece beneficios como descuentos en impuestos y facilidades en los trámites de licenciamiento para las empresas que adopten criterios de sostenibilidad.
Decreto 507 de 2023 - Bogotá	2023	Fija metas de aprovechamiento de RCD en Bogotá, con un incremento progresivo hasta el 75% en 2030. También establece la Mesa Distrital de RCD para el seguimiento y evaluación de su gestión.

*Tabla 4. Línea de tiempo de la Normativa Colombiana para la gestión de RCD*

### 2.3 Generación de residuos de construcción a nivel nacional

En Colombia se generan aproximadamente 22 millones de toneladas de RCD al año, donde Bogotá genera cerca de los 12 millones de toneladas, seguido de Medellín con 860.000 toneladas y Manizales con 306.000 toneladas (Camacol, 2024).

El sector de la construcción es un pilar de la economía del país, representa el 17.6% del producto interno bruto (PIB) de acuerdo con información del DANE (Camacol, 2022), sin embargo, este sector enfrenta un desafío importante con el medio ambiente debido a los compromisos adquiridos por el país en reducir en al menos un 30% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en donde el sector de la construcción aporta el 40% de las emisiones totales (Ministerio de ambiente, 2021).

En la historia del país la gestión de los RCD se fundamenta únicamente en la disposición final y aunque desde el 2018 Colombia ha incursionado en la economía circular y en la gestión de residuos a través de reciclaje, reutilización y aprovechamiento de RCD, la realidad es que hay una descontrolada generación de residuos debido al rápido crecimiento poblacional y no se ha fomentado la recuperación y reutilización de los materiales y se continua con una mentalidad de una economía lineal.

Sin embargo, como un esfuerzo del país para incentivar y generar bases sólidas para el cumplimiento de la meta de disminución de gases de efecto invernadero, en el año 2017 se dio a conocer la resolución 0472 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en donde se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en actividades de la construcción, en este documento se definieron términos como:

- **Grandes generadores:** Empresas constructoras o personal natural o jurídica que realizan proyectos con un área construida superior a los 2,000 m<sup>2</sup>. Requiere expedición de licencia de construcción.
- **Pequeños generadores:** Empresas constructoras o persona natural o jurídica que realizan proyectos con un área construida inferior a los 2,000 m<sup>2</sup>. No requiere expedición de licencia de construcción.
- **Aprovechamiento de RCD:** Proceso que comprende la reutilización, tratamiento y reciclaje de los RCD, con el fin de realizar su reincorporación al ciclo económico.

- **Plantas de aprovechamiento:** Son las instalaciones en las cuales se realizan actividades de separación, almacenamiento temporal, reutilización, tratamiento y reciclaje de RCD
- **Receptor:** Persona natural o jurídica que utiliza RCD para aprovechamiento como materia prima dentro de su proceso constructivo.

También, se definieron unas metas de aprovechamiento de RCD ilustradas en la Tabla 5, las cuales son de obligatorio cumplimiento de acuerdo con el artículo 19 “Metas de aprovechamiento de RCD”, donde los grandes generadores deben reutilizar los RCD aprovechables en un porcentaje no inferior al 2% en peso del total de los materiales utilizados en la obra, según lo dispuesto en la Tabla 5 y se deberá generar un incremento de dos puntos porcentuales para los años posteriores hasta alcanzar el 30% de aprovechamiento de RCD (MADS, 2017).

<b>Categoría Municipal</b>	<b>Cumplimiento de meta</b>
Especial, 1,2 y 3	1 de enero del 2018
4,5 y 6	1 de enero del 2023

*Tabla 5. Artículo 19 Metas de aprovechamiento, tomado del MADS 2017*

Sin embargo, en el año 2021 se realizó una actualización a la normativa con la resolución 1257 del 2021 y se ajustaron los porcentajes de aprovechamiento, tal como se evidencia en la Tabla 6 y se excluyó el material de excavación como parte del porcentaje de aprovechamiento (MADS, 2021)

<b>Categoría especial</b>	<b>Categoría 1,2 y 3</b>	<b>Categoría 4,5 y 6</b>	<b>Cumplimiento de meta</b>
25%	15%	5%	1 de enero del 2023
50%	30%	20%	1 de enero del 2026
75%	60%	40%	1 de enero del 2030

*Tabla 6. Cumplimiento de meta de aprovechamiento Resolución 1257 del 2021 (MADS)*

### 2.3.1 Bogotá

De acuerdo con información del Observatorio Ambiental (2023) se generaron al menos 11.5 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición, de las cuales se logró un aprovechamiento de 3.9 millones de toneladas, es decir, de un 34%.

Actualmente el distrito tiene la meta de controlar al menos 32 millones de toneladas de RCD con el objetivo de lograr minimizar el impacto ambiental y es por ello por lo que se desarrolló un plan de gestión orientado a un modelo eficiente y sostenible para la gestión de residuos de construcción y demolición, en donde se busca aumentar y potenciar la recuperación y reincorporación de los residuos al proceso constructivo. Para lograrlo se estructuraron las siguientes normativas:

Resolución 1138 del 2013 y Decreto 586 del 2015: Se estipula que los RCD generados deberán ser transportados y dispuestos cumpliendo con la normativa de la Resolución 01115 del 2012 y 00932 del 2015, esto con el fin de prevenir y mitigar el impacto de los RCD generados en la ciudad.

Los lugares autorizados para realizar disposición final de los residuos de construcción y demolición de acuerdo con la Secretaría Distrital del Ambiente son 5, ubicados en Ciudad Bolívar y Usme.

Finalmente, con el Decreto 507 de 2023 se adopta el modelo y los lineamientos para la gestión integral de los RCD para lograr potenciar la reincorporación de materiales al ciclo productivo, lograr minimizar la disposición final y potenciar una economía circular. También se profundiza sobre el modelo de gestión de RCD ya que contiene principios, lineamientos, organización y obligaciones de los agentes del ciclo productivo, propendiendo minimizar en la generación de RCD y minorar el impacto ambiental (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2023).

Se desarrollan líneas programáticas con metas a corto, mediano y largo plazo, las cuales son:

- Prevención
- Circularidad
- Implementación del modelo de gestión
- Desarrollo de infraestructuras de gestión
- Evaluación, control y seguimiento ambiental
- Investigación, desarrollo e innovación tecnológica
- Promoción de mecanismos e incentivos para la gestión de RCD
- Actualización, evaluación y seguimiento al modelo de gestión de RCD.

### 2.3.2 Cali

De acuerdo con el Informe Nacional de la Superintendencia de Servicios Públicos (2024), publicado en diciembre de 2023, el Valle del Cauca genera aproximadamente 3.300 toneladas de residuos al día, de los cuales la ciudad de Cali aporta el 49%, con una generación de 594.200 toneladas al año. Este volumen de residuos incluye tanto residuos domiciliarios como industriales, pero un componente significativo proviene de los RCD.

En Cali, se genera en promedio 1,1 millones de metros cúbicos de RCD al año, predominando materiales como bloques macizos, adoquines y cerámicos (CVC, 2018). Estos residuos, en su mayoría, son dispuestos en escombreras no reguladas, que no cumplen con los estándares mínimos de seguridad ni protegen adecuadamente la salud humana ni el medio ambiente.

Esta situación es cada vez más insostenible tanto económica como ambientalmente. El rápido crecimiento urbano ha incrementado la demanda de nuevas construcciones, y con ello la cantidad de RCD, lo que ha puesto en evidencia la limitada capacidad de las escombreras existentes. La necesidad de expandir o crear nuevos sitios de disposición final ha generado costos adicionales y ha acentuado los problemas asociados a la mala gestión de estos residuos.

El esfuerzo de la Alcaldía de Cali se ha centrado en potenciar el aprovechamiento de los RCD y promover prácticas más sostenibles, alineadas con los principios de la economía circular. Sin embargo, la adopción de estas prácticas sigue siendo limitada debido a factores culturales, como la prevalencia de un enfoque de economía lineal y la escasez de normativas específicas que avalen técnicamente el uso de RCD en nuevos proyectos.

En cuanto a la normativa local, se han implementado regulaciones como el Decreto 1077 de 2015, la Resolución 0472 de 2017 y la Resolución 1257 de 2021, que buscan regular la disposición final de RCD y establecer porcentajes mínimos de aprovechamiento dentro de las obras. Estas normativas tienen como objetivo fomentar la economía circular, reducir la extracción de materias primas y minimizar el impacto ambiental de las construcciones. A nivel local, Cali ha introducido el Sello Cali Construye Sostenible, una certificación ambiental que incentiva a las empresas constructoras a adoptar prácticas sostenibles. Este sello ofrece beneficios como descuentos en impuestos, incluyendo el delineación urbana y predial, además de facilitar los procesos de

licenciamiento y la formulación de planos parciales para proyectos que cumplan con los criterios de sostenibilidad establecidos.

## 2.4 Índices de generación de RCD

Son métricas utilizadas para estimar la cantidad de residuos producidos en diversas actividades del sector de la construcción, como la edificación de viviendas nuevas, remodelaciones, demoliciones o la rehabilitación de estructuras existentes. Estos indicadores se expresan generalmente en términos de volumen o peso por unidad de medida construida, como kilogramos por metro cuadrado ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) o metros cúbicos por metro cuadrado ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ).

Según el estudio de Mercante (2007), los índices de generación varían en función de la tipología de la obra y las prácticas constructivas empleadas durante su ejecución. Cabe destacar que estos índices desempeñan un papel fundamental en la planificación de la gestión de residuos en proyectos de construcción. Su aplicación permite identificar actividades con alta generación de RCD, lo que facilita el diseño de estrategias enfocadas en la reducción, el reciclaje y la reutilización de los materiales, contribuyendo así a minimizar el impacto ambiental de las obras.

### 2.4.1 Métodos para la obtención de los indicadores de RCD

Al revisar la literatura se identificaron diferentes metodologías para obtener los índices de generación de RCD, entre los encontrados se resaltan los siguientes:

- ***Método Yost – Halstead***

Propusieron una metodología que combina la recopilación de datos provenientes de licencias de construcción con la clasificación de los proyectos según su tipología estructural y uso (comercial o residencial), considerando que la cantidad de materiales varía significativamente entre estas categorías. Además, llevaron a cabo un muestreo directo en sitio y, mediante análisis de regresión lineal, estimaron las tasas de generación de residuos (Yost, 1996).

- ***Método Bossink***

Bossink y Brouwers (1996), en su estudio realizado en los Países Bajos, clasificaron los RCD en nueve categorías: pilotes, hormigón, mortero, agregados, ladrillos cerámicos, tejas, bloques, envases y otros. La estimación de los residuos se llevó a cabo analizando el

peso de cada material y considerando cómo estos fueron suministrados en la obra. Los resultados del estudio revelaron que la generación de RCD oscila entre un 1% y un 10%, dependiendo de las características y prácticas de cada proyecto (Aldana & Serpell, 2012).

- ***Método Formoso, Isatto, Hirota***

Formoso et al. (1999) proponen un método innovador para la gestión de residuos en la construcción, basado en la integración de herramientas de gestión con los principios de la metodología Lean Construction. Este enfoque comienza con la clasificación de los residuos en dos categorías: inevitables (derivados de limitaciones tecnológicas) y evitables (susceptibles de ser controlados mediante mejores prácticas). Además, incorpora herramientas de monitoreo como gráficos de producción, auditorías mensuales y análisis sistemáticos, con el objetivo de identificar y abordar las principales causas de desperdicio, promoviendo así una gestión más eficiente y sostenible en los procesos constructivos.

- ***Método Kofoworola***

Según Kofoworola y Gheewala (2009), en Tailandia, la generación de RCD ha experimentado un crecimiento significativo debido al aumento de la actividad constructiva. La metodología utilizada en su estudio se basa en el análisis de las licencias o permisos de construcción emitidos por las autoridades competentes, clasificando los proyectos según su uso: residencial o no residencial.

La estimación de la generación de RCD se realiza considerando el peso de los residuos por unidad de área construida, aplicando el Método Stock. Los resultados obtenidos indican que las edificaciones residenciales generan en promedio 21,38 kg/m<sup>2</sup>, mientras que las edificaciones no residenciales generan 18,99 kg/m<sup>2</sup>. Este enfoque permite evaluar la contribución de diferentes tipos de construcciones al volumen total de residuos generados, proporcionando una base para diseñar estrategias de gestión de RCD específicas según el tipo de proyecto.

- ***Método Stock***

El Modelo Dinámico o Modelo de Stock se centra en la cuantificación de las cantidades de materiales requeridos para un proyecto y el análisis del flujo de estos durante la fase de construcción. Este enfoque utiliza factores empíricos para estimar la generación de residuos en cada actividad ejecutada. Además, permite proyectar la cantidad total de RCD bajo diferentes escenarios, ya sean de corto o largo plazo (Llatas, 2011).

Se emplea este modelo cuando los datos disponibles no son suficientes para respaldar métodos estadísticos tradicionales de pronósticos, pero sí lo suficientemente amplios para ejecutar análisis dinámicos. La metodología utiliza variables como: cantidad de residuos generados por actividad (construcción, remodelación o demolición), flujo de materiales según su disposición y uso, métodos constructivos empleados.

- ***Método teórico pormenorizado***

Este enfoque es altamente específico debido a la facilidad con la que las actividades del proyecto de ejecución pueden descomponerse y analizarse. Se fundamenta en la premisa de que los residuos son el resultado directo de las transformaciones que experimentan los recursos suministrados a la obra, así como sus envases, una vez incorporados a los procesos constructivos (Llatas, 2011).

Según Bernardo, Gomes y de Brito (2016), los indicadores de generación de RCD se construyen a partir de relaciones lógicas entre variables, como la cantidad de residuos generados en volumen por metro cúbico y el área de edificación demolida en metros cuadrados, o la densidad de los residuos por metro cúbico y el área construida en metros cuadrados. En la presente investigación, estas relaciones empíricas se establecen en función de las actividades realizadas en los proyectos de construcción y la cantidad de RCD generados, permitiendo una mayor precisión en la estimación y análisis de los residuos.

## **2.5 Estrategias de aprovechamiento de RCD**

A medida que se ha venido conociendo las propiedades mecánicas de los RCD y se ha logrado implementar el aval de las normas técnicas de cada país para la incorporación de estos residuos en diferentes actividades del sector constructor, se han desarrollado diferentes alternativas de aprovechamiento de estos residuos que han presentado resultados favorables que contribuyen a que cada día más empresas constructoras comiencen a aprovechar los RCD que generan.

En Colombia se han realizado estudios que avalan como la incorporación del RCD trae beneficios a los proyectos, entre ellos se resaltan los siguientes:

### 2.5.1 Mejora del suelo mediante la sustitución de la mezcla de suelo procedente de residuos de construcción y demolición (RCD)

La reutilización de los RCD en proyectos de infraestructura es una estrategia sostenible que contribuye a mitigar el impacto ambiental de la construcción, reducir costos y mejorar el desempeño de los materiales en obras viales. En este contexto, Hidalgo (2022) llevó a cabo un estudio en el que se incorporó entre 20% y 40% de residuo cerámico al suelo natural, con el objetivo de evaluar su comportamiento e impacto en la estabilidad y resistencia del terreno.

El macroproyecto objeto de estudio contempla la construcción de vías de acceso con un diseño de pavimento flexible, compuesto por una estructura de subbase, base y carpeta asfáltica, apoyada sobre la subrasante natural del terreno. En los últimos años, diversas investigaciones han demostrado la viabilidad técnica y económica de incorporar RCD en la construcción de vías, ya sea para mejorar las condiciones del terreno de soporte o como sustituto parcial de materiales convencionales.

En el contexto del macroproyecto de estudio, se identifica el potencial uso de residuos cerámicos (Rb) para el mejoramiento de la subrasante, tomando como referencia los resultados obtenidos por Hidalgo (2022). Su estudio demostró que la adición de residuos cerámicos en mezclas con suelos limosos genera incrementos en la capacidad portante y mejoras en las propiedades mecánicas del terreno. Los ensayos realizados incluyen diferentes proporciones de RCD cerámico (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% y 70%), evaluando su impacto en la compactación, resistencia y comportamiento resiliente del material. Entre los hallazgos más relevantes, se destacó que el contenido óptimo de residuos cerámicos para mejorar la subrasante se encuentra en un rango del 30% - 40%, lo que permite obtener beneficios como:

- Aumento en la densidad seca máxima y reducción en la humedad óptima de compactación, mejorando la compactibilidad del material y la eficiencia del proceso constructivo.
- Incremento significativo del CBR, con valores comparables a materiales de subbase granular según la norma AASHTO M147-65.
- Se evidenció un aumento del módulo resiliente con hasta 40% de RCD cerámico Rb, lo que indica una mayor resistencia a la deformación bajo cargas repetidas, similar al comportamiento de una subbase granular.

Estos resultados resaltan el potencial técnico y económico de utilizar residuos cerámicos en la estructura del pavimento, ya que permitirían reducir los espesores de las capas de subbase, base y carpeta asfáltica, optimizando así el uso de materiales y disminuyendo costos.

No obstante, es fundamental considerar que, en el macroproyecto en estudio, la subrasante está compuesta por un suelo limoso arcilloso de baja plasticidad, lo que difiere del suelo limoso utilizado en la investigación de Hidalgo (2022). La presencia de arcilla puede influir en la compactación y en la interacción del RCD con el suelo natural, lo que hace imprescindible la realización de ensayos de laboratorio específicos con el suelo del proyecto y con el RCD cerámico generado en obra. Estas pruebas permitirán evaluar con precisión la viabilidad técnica y económica de la incorporación de RCD en la construcción de las vías del macroproyecto, asegurando su efectividad en el mejoramiento de la subrasante.

Por otra parte, el estudio de Reyes (2019), evaluó la influencia de la incorporación de residuos cerámicos (Rb) en la subbase granular, a través de ensayos de CBR, Proctor Modificado, índice de plasticidad, granulometría y contenido de humedad seca. Para ello, se prepararon cuatro tipos de mezclas, la primera con 100% subbase (Muestra tipo), la segunda con 87.5% subbase + 12.5% Rb, la tercera con 75% subbase + 25% Rb y la cuarta mezcla con 50% subbase + 50% Rb.

Los resultados indicaron que, a mayor contenido de residuos cerámicos, se producía un aumento en la densidad del suelo y una reducción en el contenido de humedad, con variaciones que oscilaban entre 1% y 3%. La mezcla con 50% de Rb obtuvo los mejores resultados, superando la muestra tipo en términos de capacidad portante.

En cuanto a los ensayos CBR, los valores obtenidos fueron los siguientes:

- Muestra tipo (100% subbase granular): 11,8%
- Subbase con 12,5% de Rb: 22,7%
- Subbase con 25% de Rb: 30,4%
- Subbase con 50% de Rb: 37,6%

Estos resultados evidencian cómo la incorporación de residuos cerámicos mejora significativamente las propiedades mecánicas de la subbase granular, logrando un mejor desempeño estructural en comparación con el uso exclusivo de material convencional. La reducción del contenido de humedad, junto con la modificación de propiedades como el índice de

plasticidad y la humedad seca, permite que la estructura del pavimento aumente su capacidad portante y mejore su resistencia a la deformación.

Los hallazgos de Hidalgo (2022) y Reyes (2019) refuerzan la viabilidad de incorporar residuos cerámicos en la construcción de vías del macroproyecto, especialmente en el mejoramiento de la subrasante y en la subbase granular. Sin embargo, dada la diferencia en la tipología de suelos, es imprescindible realizar ensayos específicos con el suelo limo arcilloso del proyecto para validar su comportamiento en condiciones reales.

### 2.5.2 Mejoramiento del terreno natural con la incorporación del RCD cerámico

El proyecto del estudio de caso se desarrolla sobre un suelo limo arcilloso de baja plasticidad, lo que impone desafíos geotécnicos que deben ser abordados para garantizar la estabilidad estructural de las viviendas. De acuerdo con el estudio de suelos, la estructura de cimentación requiere una capa de material de mejoramiento con un espesor entre 40 cm y 60 cm, la cual puede estar compuesta por roca muerta o tierra amarilla, siempre que cumpla con las especificaciones técnicas establecidas en el estudio geotécnico.

En este contexto, una de las estrategias de aprovechamiento de RCD que se plantea para el proyecto es la incorporación de residuos cerámicos (Rb) en la mezcla con el suelo natural. Esta alternativa se fundamenta en que el residuo cerámico es el RCD predominante en el proyecto, además de que sus características físicas favorecen la reducción del contenido de humedad en el suelo, lo que mejora su comportamiento mecánico.

Devia (2021) respalda esta estrategia, ya que su investigación demostró que la incorporación de polvo de ladrillo proveniente de la zona de corte de mampostería en un 40% a una muestra de suelo redujo su contenido de humedad entre un 15% y un 18% en comparación con la muestra sin adición de Rb. Asimismo, se realizaron ensayos de laboratorio con porcentajes de incorporación del 5%, 10%, y 20%, evidenciando que, a mayor contenido de residuo cerámico, el suelo presentaba mejores resultados en la reducción de humedad y en el incremento de su peso unitario. Este último aspecto es crucial, ya que una mayor densidad del suelo implica un aumento en su capacidad portante, lo que se traduce en un mejor desempeño estructural.

Los resultados obtenidos en la tesis de Devia (2021) resultan especialmente relevantes para el estudio de caso, dado que las condiciones del suelo analizadas en su investigación presentan similitudes con el suelo del proyecto, lo que permite inferir que la aplicación de esta estrategia podría optimizar las condiciones del terreno. Un aspecto clave de esta mejora es que, al incrementar la capacidad portante del suelo, es posible reducir el espesor de la capa de material de mejoramiento necesario para la cimentación, lo que representa un beneficio tanto técnico como económico.

Otro aspecto analizado por Devia (2021) fue el comportamiento del suelo frente a la saturación tras la incorporación de residuos cerámicos. Sus pruebas demostraron que un mayor porcentaje de incorporación de Rb (hasta un 40%), se obtenía una reducción en el grado de saturación de la muestra, lo que se traduce en un incremento en su rigidez.

Este fenómeno mejora significativamente las propiedades mecánicas del suelo, haciendo más resistente a deformaciones y asentamientos, lo que refuerza la viabilidad de esta estrategia de aprovechamiento dentro del proyecto de estudio de caso.

### 2.5.3 Incorporación de RCD a las mezclas de concreto preparado de obra

Dado el volumen significativo de residuos que se generan en la construcción de viviendas, resulta imprescindible evaluar técnicamente alternativas complementarias al aprovechamiento de RCD cerámico en el mejoramiento de subrasantes. Una opción identificada en la literatura es la incorporación de estos residuos en el diseño de mezclas de concreto no estructural con una resistencia de 21 MPa.

De acuerdo con la tesis de Devia (2021) los concretos no estructurales que incorporaron 10% y 20% de RCD cerámico como reemplazo del agregado grueso alcanzaron resistencias superiores a los 21 MPa a los 28 días. Estas mezclas utilizaron residuos cerámicos triturados con un tamaño de partícula de  $\frac{3}{4}$ ". Aunque presentaron un asentamiento un 25% inferior al concreto convencional preparado en obra sin RCD, se observó que, a mayor porcentaje de incorporación, el asentamiento del concreto incrementaba.

Por otro lado, Devia (2021) evaluó concretos no estructurales fabricados en obra con la incorporación de 10%, 20%, y 33% de residuos cerámicos como sustituto del triturado grueso. Los

resultados mostraron resistencias a compresión de 15.7 MPa, 24.19 MPa y 20.92 MPa, respectivamente, en comparación con una muestra de referencia de 15 MPa. La investigación concluyó que la resistencia a compresión aumenta proporcionalmente con el porcentaje de RCD cerámico. Según Martínez, este comportamiento se debe a la alta capacidad de absorción de agua del residuo cerámico, lo que reduce la relación agua/cemento y, en consecuencia, incrementa la resistencia del concreto.

Ambas investigaciones destacan la importancia de utilizar un tamaño de partícula de  $\frac{3}{4}$ " para el residuo cerámico y de controlar cuidadosamente el volumen de agua incorporado en la mezcla, dado que estos residuos tienden a absorber una mayor cantidad de agua en comparación con el triturado convencional. Asimismo, subrayan que el porcentaje de incorporación del cerámico en el concreto preparado en obra no debe superar el 40%, ya que a medida que se incrementa el porcentaje de RCD cerámico a la mezcla, la resistencia a la compresión tiende a disminuir, lo que podría comprometer el cumplimiento de la resistencia esperada al cabo de los 28 días.

## **2.6 Planes de gestión integral de RCD para vivienda**

En Colombia, algunas entidades públicas y privadas han desarrollado planes de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) para proyectos de vivienda, con el fin de lograr una eficiencia dentro de sus proyectos y dar cumplimiento a las normativas ambientales que los regulan.

### **2.6.1 Guía para la elaboración del PG de RCD en obra**

La Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) ha desarrollado una herramienta técnica orientada a reducir los impactos ambientales generados en las distintas fases de los proyectos constructivos. Esta guía proporciona directrices claras para que el sector de la construcción gestione y controle los residuos de construcción y demolición (RCD) conforme a la normativa ambiental vigente (SDA, 2015).

La guía también establece una estructura por fases constructivas que abarca demolición, excavación y construcción, detallando las actividades predominantes en cada etapa y proporcionando descripciones técnicas sobre su impacto en la generación de residuos.

Para garantizar una gestión ambiental eficiente basada en el uso racional de materiales y la minimización de residuos, la SDA plantea un orden jerárquico en la gestión de RCD, el cual se desarrolla bajo los principios mostrados en la Figura 3:



*Figura 3. Imagen tomada de la Guía para la elaboración del plan de gestión de RCD en obra.*

Dado que los RCD presentan un alto potencial de aprovechamiento, su reincorporación en el ciclo productivo depende de la implementación de buenas prácticas dentro de las obras, especialmente la separación en la fuente. En los proyectos donde no se implementa esta práctica, los residuos tienden a contaminarse, dificultando su recuperación y promoviendo su disposición en botaderos, cuando podrían haber sido reutilizados o reciclados (SDA, 2015).

Para lograr la adecuada gestión se describen procesos que maximizan la separación en la fuente y se aumenta el aprovechamiento:

- a. **Demolición selectiva:** Este proceso busca recuperar materiales con potencial de reutilización o reciclaje antes de una demolición. Consiste en una separación sistemática de los elementos constructivos para evitar la contaminación de los residuos aprovechables. Las actividades incluyen:
  - Retiro de instalaciones eléctricas e hidráulicas.
  - Extracción de puertas y ventanas.

- Desmontaje estructural por fases antes de la demolición final.
  - Clasificación y almacenamiento ordenado de los materiales obtenidos.
- b. **Reutilización:** Consiste en el uso directo de materiales en su estado original, sin necesidad de someterlos a procesos adicionales. Esta práctica puede realizarse dentro del proyecto o en otras obras que requieran insumos similares. Para garantizar su trazabilidad, los materiales reutilizados deben ser registrados en el Plan de Gestión de RCD y reportados a la Secretaría Distrital de Ambiente.
- c. **Reciclaje:** Este proceso permite la recolección y transformación de RCD en nuevos materiales, reincorporándolos en el ciclo productivo. En este sentido, la guía menciona el uso de plantas móviles de reciclaje, las cuales pueden procesar residuos directamente en el sitio de la obra, reduciendo costos de transporte y disposición final.
- d. **Gestión de residuos peligrosos:** El manejo de residuos peligrosos debe cumplir con la normativa nacional vigente. La guía hace referencia al Decreto 4741 de 2005, el cual establece las obligaciones del generador de residuos peligrosos, asegurando su almacenamiento, transporte y disposición final en condiciones seguras para la salud pública y el medio ambiente.

Además de los procesos anteriores, la SDA recomienda una serie de medidas operativas para mejorar la eficiencia en la gestión de RCD dentro de las obras, tales como, estimar las cantidades de RCD generados en cada fase, identificación de puntos de acopio dentro de la obra, selección de gestores, etc.

La guía de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá proporciona un marco de referencia detallado para la gestión eficiente de RCD en obras de construcción. Sus estrategias y medidas buscan optimizar el uso de recursos, reducir el impacto ambiental y fomentar la reutilización y reciclaje de materiales.

#### 2.6.2 Plan de Gestión Integral de RCD, obra 826 Central, en la empresa Jaramillo Mora

El proyecto 826 Central, desarrollado por la empresa Jaramillo Mora, evidencia la necesidad de implementar un Plan de Gestión Integral de RCD para optimizar el manejo de los residuos generados en la demolición y en la construcción de nuevos edificios. Este plan busca no solo la mitigación de impactos negativos, sino también el aprovechamiento de los residuos en la

producción de materiales de construcción, contribuyendo así a la economía circular y al desarrollo sostenible (Barbosa, 2023).

En la obra 826 Central, los RCD fueron clasificados en dos categorías principales:

- **M1:** Residuos de concreto.
- **M2:** Residuos cerámicos y de mampostería.

Estos residuos son gestionados a través de procesos de separación en la fuente, almacenamiento temporal y posterior aprovechamiento en la producción de materiales para la construcción de elementos no estructurales.

El Plan de Gestión Integral de RCD de la obra 826 Central establece estrategias específicas para maximizar el aprovechamiento de los residuos generados. Entre las alternativas destacadas se encuentran la producción de agregados reciclados, la separación en la fuente, el uso de plantas móviles de reciclaje y la gestión de residuos peligrosos.

### 3 METODOLOGÍA

La metodología del proyecto de grado se estructura en cinco etapas fundamentales, con el objetivo de evaluar económica y estratégicamente el plan de gestión integral de RCD para un macroproyecto de vivienda de interés prioritaria. Como se muestra en la Figura 4, cada etapa se desarrolla de manera secuencial, permitiendo un análisis detallado de los volúmenes de RCD generados y la viabilidad de su aprovechamiento en la construcción.

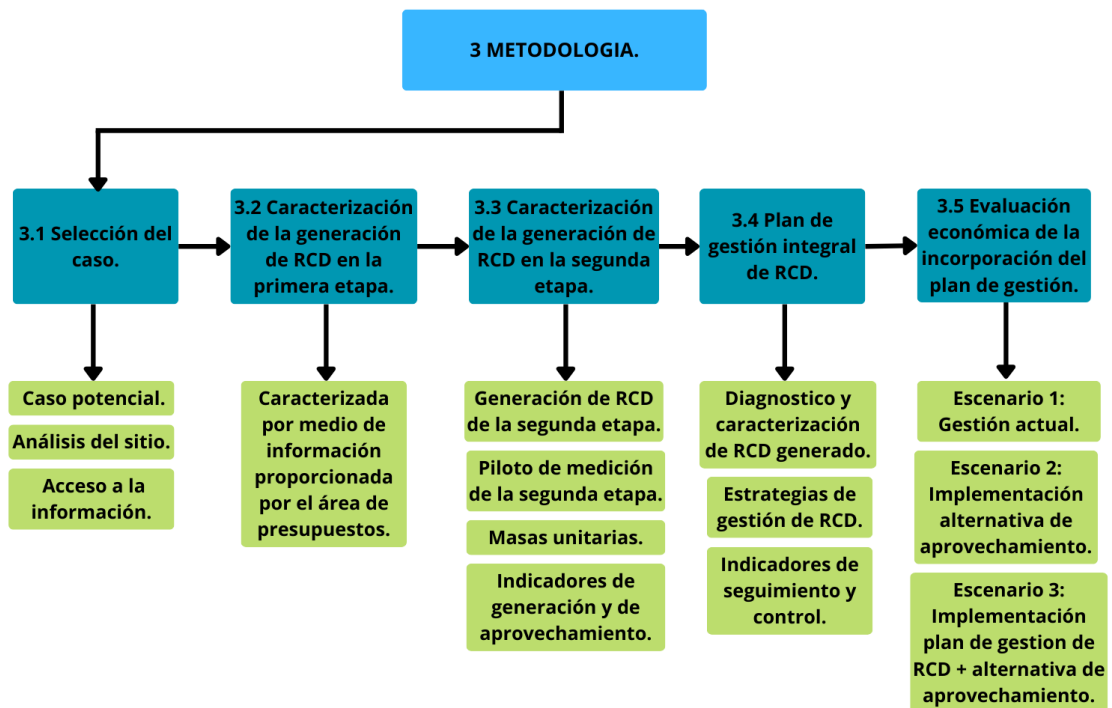


Figura 4. Esquema general de la metodología

En la primera fase, se realizó la selección del estudio de caso bajo el cumplimiento de parámetros como ubicación, área construida, sistema de construcción y acceso a la información.

Para la segunda fase se analizaron los datos de la primera etapa del proyecto (260 unidades de vivienda), incluyendo los volúmenes de RCD generados y sus costos asociados. Esto permitió establecer una línea base de índices de generación y explorar alternativas de aprovechamiento, como agregados reciclados y rellenos, bajo normativas sismorresistentes y estándares de calidad.

La tercera fase consistió en la medición directa de RCD durante la segunda etapa (524 unidades de vivienda). Mediante visitas quincenales durante dos meses, se clasificaron los residuos en cinco categorías y se calcularon sus masas unitarios, permitiendo identificar las actividades constructivas más incidentes en la generación de residuos para finalmente calcular los índices de generación para la segunda etapa del macroproyecto.

En la cuarta fase, se estructuró un plan de gestión integral de RCD alineado con normativas ambientales del país y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este plan incluyó estrategias específicas para la reducción, reutilización y reciclaje, definiendo roles, responsabilidades y procesos dentro de la empresa constructora.

Finalmente, en la quinta fase, se realizó una evaluación económica de tres escenarios:

- ***Escenario con la estrategia de aprovechamiento:*** En este escenario se consideraron los costos asociados a la implementación de la estrategia de aprovechamiento del residuo cerámico (Rb) como sustituto parcial de material granular. Para ello, se elaboraron análisis de precios unitarios detallados que permitieron estimar los recursos requeridos en cada etapa del proceso. Asimismo, se incluyeron los beneficios económicos derivados de la disminución en el volumen de residuos enviados a disposición final.
- ***Escenario con implementación del plan de gestión:*** Se considera los costos asociados con la implementación del plan de gestión, incluyendo inversión inicial en infraestructura de reciclaje, capacitación, y cualquier ajuste en los procesos de construcción. También se incluyeron los beneficios proyectados, como la reducción de costos de disposición, ahorros en la compra de materiales mediante el uso de RCD como agregados reciclados, y los incentivos tributarios aplicables.
- ***Escenario Sin Implementación (Escenario Actual):*** Se analizaron los costos asociados con la continuación del manejo actual de los residuos de construcción, que implica únicamente el retiro externo a sitios de disposición final. Se evaluaron los riesgos financieros y operativos asociados con el incumplimiento normativo y la pérdida de oportunidades económicas derivadas de la gestión inadecuada de los residuos.

### 3.1 Selección del caso

Para la selección del proyecto para desarrollar el proyecto de grado se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

#### 3.1.1 Criterios de selección

Para seleccionar el proyecto de estudio de caso se definieron criterios clave que garantizaran su viabilidad operativa y logística, permitiendo identificar un proyecto representativo de la empresa constructora y adecuado para el levantamiento de información en campo y el análisis de los residuos generados.

- **Ubicación:** El macroproyecto está localizado en el municipio de Puerto Tejada, Cauca, una región que experimenta un rápido desarrollo urbano impulsado por el creciente auge de proyectos de construcción que están transformando su dinámica económica y social.
- **Área de construcción:** Se requiere que el proyecto se encuentre dentro de la clasificación de gran generador como lo indica la resolución N°0472-2017 del MADS y para ello el área de construcción debe ser superior a los 2.000 m<sup>2</sup>.
- **Metodología constructiva:** Se priorizó la selección de un proyecto con un sistema constructivo en mampostería estructural, dado que este es el tipo predominante en la empresa constructora.
- **Etapas constructivas:** Se consideraron tres etapas constructivas principales: cimentación, estructura y acabados. El análisis de estas fases permitió identificar las actividades con mayor potencial para el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD).
- **Programación de obra:** Teniendo en cuenta los tiempos para desarrollar el proyecto de investigación, se tuvo en cuenta que la programación del proyecto este alineada con los requerimientos para llevar a cabo la investigación.

#### 3.1.2 Caso potencial

La selección del caso potencial se basó en el cumplimiento de criterios específicos como la ubicación geográfica, el área del proyecto, el sistema constructivo empleado y la programación de

obra. Tras identificar los proyectos que cumplían con estos requisitos, se llevó a cabo un análisis detallado para determinar cuál se alineaba de manera óptima con los criterios establecidos, obteniendo la información de la Tabla 7.

Proyecto	Ubicación	Área superior a 2000 m <sup>2</sup>	Sistema constructivo	Programación de obra
CA-1	Si	Si	Si	Si
AST-1	No	Si	Si	No
SSB-1	No	Si	Si	Si

*Tabla 7. Selección del caso potencial*

- **Proyecto CA-1:** El macroproyecto cuenta con un área total superior a 30.000 m<sup>2</sup> y está compuesto por casas de dos pisos en mampostería estructural, diseñadas como viviendas multifamiliares VIP. Durante la inspección, se identificó que el proyecto se encontraba en la fase inicial de la segunda etapa, con actividades centradas en los movimientos de tierras. Además, gracias a la amplia extensión del lote, se identificó la posibilidad de destinar áreas específicas para el acopio de residuos de materiales de construcción, lo que facilitará su manejo y caracterización durante las siguientes fases del proyecto.
- **Proyecto AST-1:** El macroproyecto se distingue por contar con un área superior a 10.000 m<sup>2</sup> y estar conformado por casas de dos pisos en mampostería estructural, diseñadas como viviendas unifamiliares VIS. Sin embargo, su ubicación en la ciudad de Cartagena dificulta la realización de inspecciones de campo continuas. Además, al encontrarse en la fase final de construcción, no se alinea con los requerimientos del estudio de caso, ya que limita la posibilidad de evaluar etapas clave del proyecto necesarias para el análisis.
- **Proyecto SSB-1:** Se trata de un proyecto de vivienda multifamiliar VIP, compuesto por casas en mampostería estructural, con un área total superior a 3.000 m<sup>2</sup>. No obstante, su ubicación en la ciudad de Barranquilla dificulta la realización de visitas continuas, lo que limita su potencialidad para el desarrollo del estudio de caso.

De los tres casos analizados, el proyecto CA-1 es el que mejor cumple con los criterios establecidos para desarrollar el estudio de caso. Esto se debe principalmente a su ubicación geográfica, que facilita la realización de inspecciones de campo continuos, permitiendo así la recolección de datos clave necesarios para el desarrollo y análisis del proyecto.

### 3.1.3 Recopilación de la información

Al seleccionar el estudio de caso, se procedió a realizar un análisis del sitio y a recopilar la información relevante sobre la generación y caracterización de los residuos de construcción y demolición (RCD). Inicialmente, esta información fue obtenida a partir del presupuesto de obra proporcionado por la empresa constructora, lo que permitió realizar un diagnóstico del estado actual del proyecto, así como un análisis preliminar de los materiales utilizados, sus consumos y los costos asociados.

### 3.1.4 Análisis del sitio

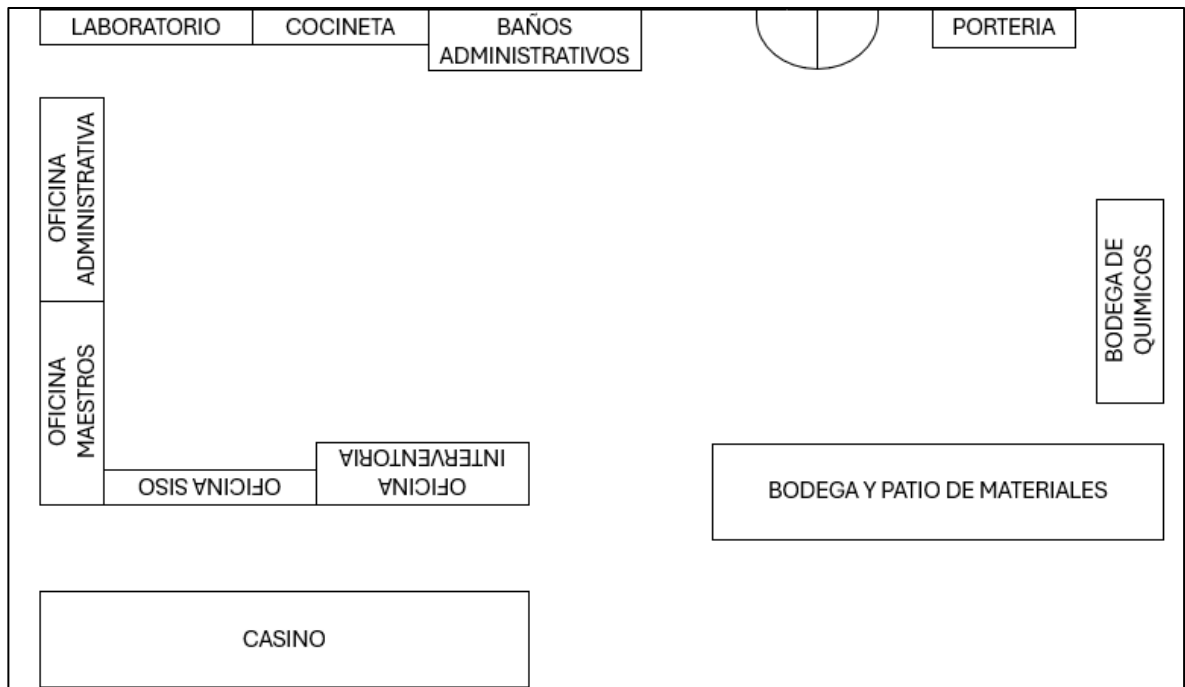
El proyecto CA-1 está conformado por 524 unidades de vivienda en mampostería estructural, se encuentran distribuidas en 6 manzanas conformadas por dos hiladas de 46 unidades, en cada hilada predominan las pachas de 8 casas y de 6 casas. Cada vivienda es de dos niveles y cuentan con un área total construida de  $46.69 \text{ m}^2$  y un área privada de  $40.97 \text{ m}^2$ , cada casa se caracteriza por tener antejardín y patio posterior el cual está cerrado por un muro en mampostería estructural. De acuerdo con la Figura 5, la planta baja está conformada por la sala-comedor, la cocina y el baño auxiliar, mientras que la planta superior se encuentra conformada por una habitación principal, una habitación auxiliar y un espacio disponible para futuro desarrollo.



Figura 5. Planta arquitectónica de una casa tipo. Fuente: Empresa Constructora

Por otra parte, se identificó que la zona de campamento de obra incluye una portería provisional para el control del acceso peatonal y vehicular al proyecto. El campamento está estructurado de acuerdo con la Figura 6 con las siguientes áreas principales:

- **Oficinas administrativas:** Espacios destinados para los directores y residentes de obra, el coordinador e inspector SISO, la interventoría y reuniones de equipo.
- **Patio de bodegas:** Compuesto por cuatro contenedores utilizados para el almacenamiento de accesorios y materiales de la obra. Además, cuenta con un área específica para el acopio de acero y tubería.
- **Zona del casino:** Área destinada al comedor del personal.
- **Espacio para muestras de laboratorio:** Ubicación para realizar pruebas y análisis relacionados con el control de calidad.
- **Baños:** Instalaciones para el uso del personal administrativo.
- **Campamento de contratistas:** Área independiente destinada al alojamiento y actividades de los contratistas.



*Figura 6. Distribución del campamento de obra*

Al continuar analizando el estado del proyecto del estudio de caso, se reconoció que la segunda etapa del proyecto CA-1 iba a comenzar movimientos de tierra para conformar las terrazas y poder iniciar la fase de construcción de las viviendas.

Durante la inspección también se identificaron los sitios de acopio provisionales que se encuentran dentro del proyecto, estos puntos son importantes porque va a permitir cuantificar y clasificar los RCD, sin embargo, cabe resaltar que durante la visita se identificó que estos sitios de acopio no se encuentran en el mejor estado dado que en muchas ocasiones no se genera la separación adecuada, ni tampoco hay un orden y aseo, por otra parte, no se tiene consciencia sobre la importancia de la separación de los RCD tales como residuos cerámicos, residuos de concreto y todo este material se encuentra acopiado en un sola pila en diferentes puntos del proyecto, tal cual como se muestra en la Figuras 7:

a. Residuo de excavación



b. Residuo cerámico



c. Acopios temporales



d. Residuo combinado



e. Residuo de acero



f. Residuo de madera



*Figura 7. Acopios temporales en obra*

La finalidad fue analizar el área del proyecto e identificar los puntos estratégicos donde se llevó a cabo la generación de residuos de construcción y demolición (RCD). Este enfoque permitió evaluar de manera eficiente los volúmenes generados, considerando que la fase de construcción de la estructura es la principal actividad que contribuye significativamente a la producción de residuos.

### 3.1.5 Acceso a la información

Se gestionó con la empresa constructora la autorización para el manejo de la información del macroproyecto, lo que permite acceder a planos arquitectónicos, presupuestos, informes de avances de obra, recibos de soporte relacionados con el desalojo de material, y demás documentación relevante necesaria para el desarrollo integral del estudio de caso.

## 3.2 Caracterización de la generación de RCD en la primera etapa

Para estimar la generación de RCD correspondiente a la primera etapa del proyecto, se recopiló información detallada sobre las cantidades de obra realmente ejecutadas durante la fase constructiva. Cabe resaltar que la empresa constructora realiza una diferenciación entre el volumen

de residuos originados en la edificación de vivienda y los generados en las obras de urbanismo, lo que permitió desarrollar un análisis más preciso enfocado en las 260 unidades de vivienda construidas durante esta fase.

Con el objetivo de determinar la generación de RCD por unidad de vivienda, se solicitó a la empresa la información referente al volumen total de residuos efectivamente retirados del proyecto y llevados a sitios de disposición final y por medio de la Ecuación 1 se logró determinar la información necesaria:

$$\text{Volumen de RCD por casa} = \frac{\text{Volumen retirado}}{\text{Unidades de vivienda}} \quad (1)$$

Sin embargo, un análisis técnico exige no solo conocer el volumen total de residuos generados, sino también su peso, especialmente para poder calcular indicadores gravimétricos que den cuenta de la magnitud real de los desperdicios.

Dado que durante la ejecución de la primera etapa no se realizó un seguimiento específico por tipo de residuo ni se documentó el peso individual de los RCD, fue necesario recurrir a una metodología indirecta basada en el análisis de desperdicios materiales. Para ello, se utilizaron los datos suministrados por el área de presupuesto de la empresa constructora, los cuales permitieron comparar las cantidades de materiales presupuestadas sin incluir desperdicios frente a las cantidades realmente consumidas. La diferencia entre estos valores se interpretó como la cantidad de material desperdiciado durante el proceso constructivo.

Los materiales considerados para este análisis fueron aquellos identificados como predominantes en el sistema constructivo de mampostería estructural del proyecto: ladrillo, concreto, acero, tubería, cemento, cerámica y tejas. Para cada uno de estos insumos se identificó su peso específico con base en las fichas técnicas y especificaciones entregadas por los proveedores. Posteriormente, se utilizó la Ecuación 2 para obtener el peso total de residuos por material.

$$\text{Peso del residuo} = C \times U \quad (2)$$

Donde:

C: Unidades desperdiciadas del insumo

U: Peso por cada unidad del insumo

Esta metodología permitió establecer una primera estimación del peso total de RCD generados durante la construcción de las 260 unidades de vivienda de la primera etapa, información clave para comparar con los datos obtenidos en campo durante la segunda etapa y proyectar escenarios de generación y aprovechamiento en el marco del plan de gestión integral propuesto.

### **3.3 Caracterización de la generación de RCD en la segunda etapa**

Este capítulo aborda la caracterización técnica y cuantitativa de los RCD generados en la segunda etapa del proyecto, basándose en la NTC 6422 y la Resolución 0472 de 2017. Se clasifica la tipología de residuos, se ejecuta un piloto de medición en campo para identificar los RCD predominantes y se determinan las masas unitarias de cada tipo de residuo. A partir de estos datos, se calculan los indicadores volumétricos y gravimétricos de generación de RCD, permitiendo estimar la cantidad de residuos por metro cuadrado construido. Esta información sirve como base para proyectar escenarios de aprovechamiento y cumplir con la normativa ambiental vigente.

#### **3.3.1 Clasificación de los RCD**

Se establece una clasificación específica de los residuos considerando la realidad del macroproyecto y los aspectos más relevantes de las normativas vigentes. En la Figura 8 se presenta la clasificación establecida por la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la cual distingue entre residuos susceptibles de aprovechamiento y no susceptibles de aprovechamiento.

<b>TIPO DE RCD</b>
<b>1. Residuos de construcción y demolición –RCD- susceptibles de aprovechamiento:</b>
1.1. Productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terreno: coberturas vegetales, tierras, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros.
1.2. Productos de cimentaciones y pilotajes: arcillas, bentonitas y demás.
1.3. Pétreos: hormigón, arenas, gravas, gravillas, cantos, pétreos asfálticos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, entre otros.
1.4. No pétreos: vidrio, metales como acero, hierro, cobre, aluminio, con o sin recubrimientos de zinc o estaño, plásticos tales como PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno y de poliuretano, gomas y cauchos, compuestos de madera o cartón-yeso (drywall), entre otros.
<b>2. Residuos de construcción y demolición –RCD- no susceptibles de aprovechamiento:</b>
2.1. Los contaminados con residuos peligrosos.
2.2. Los que por su estado no pueden ser aprovechados.
2.3. Los que tengan características de peligrosidad, estos se regirán por la normatividad ambiental especial establecida para su gestión.

*Figura 8. Clasificación de RCD (Tomado de: la Resolución 0472 del 2017 MADS)*

También se consideró la Norma técnica colombiana NTC 6422 (Icontec, 2021), que aborda la clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados, estableciendo seis grupos de clasificación, Rc, Ru, Rb, Ra, Rg y X, la composición de estos grupos se puede observar en la Figura 19 presentada a continuación:

Componente	Descripción
Rc	Residuos de concreto
	Residuos de productos de concreto
	Residuos de mortero
	Residuos de unidades de mampostería de concreto
Ru	Agregados ligados hidráulicamente
	Agregados no ligados
	Piedra natural
Rb	Residuos de mampostería de arcilla (por ejemplo: ladrillos y tejas)
	Unidades de mampostería de silicato de calcio
	Concreto permeable no flotante
	Residuos de material cerámico
Ra	Residuos de material asfáltico
Rg	Vidrio:
	Residuos de vidrio plano, incluyendo espejos
	vidrio de borosilicato
	Residuos de faros de automóviles
	Otros vidrios que pueden resultar perjudiciales cuando son incorporados en el concreto (reacción álcalis-sílice)
x	<b>Otros:</b>
	Materiales cohesivos (por ejemplo, arcilla y suelo)
	Residuos de concreto o morteros recubiertos con acabados que contienen yeso
	Residuos de concreto o mortero recubiertos con acabados arquitectónicos que puedan contener sustancias dañinas para el concreto
	<b>materiales metálicos magnéticos y no magnéticos:</b>
	Acero, hierro, metal galvanizado, níquel.
	Aluminio, latón, cobre, zinc, plomo, titanio, (se incluye el mármol por su gran densidad).
	<b>Plásticos y caucho no flotante:</b>
	Productos a base de caucho.
	Tuberías en PVC.
	Derivados del polipropileno
	Residuos de fibras sintéticas no aptas para el concreto.
	<b>Material químicamente contaminado o expuesto a ambientes agresivos:</b>
	Ambientes industriales (pesada, metalúrgica, química o similares)
	Contacto directo con el suelo o con ambientes de extrema humedad.
	Contacto directo y prolongado con lixiviados
	Contacto directo con agua de mar.
	Elementos con altos contenidos de pintura o barniz.
	<b>Residuos de materia orgánica:</b>
	Residuos vegetales o masas orgánicas.
	Tierra o lodos.
	Residuos de madera no flotantes.
	Residuos de bambú o guadua no flotantes.
Bareque o adobe.	

Figura 19. Clasificación de RCD (Norma técnica colombiana NTC 6422 del 2021)

Teniendo en cuenta las normativas anteriormente descritas se adoptó el uso de la nomenclatura propuesta en la NTC 6422, adicionalmente se propone la creación de nuevos grupos de clasificación en los casos donde se genere la unión de dos o más residuos, por ejemplo, en el macroproyecto se encontró un residuo que combinaba residuos de concreto, residuos cerámicos y demás residuos, en este caso, a este tipo de residuo combinado se le denominó Rc+Rb+Otros.

Definida la clasificación de los RCD se continúa con el análisis de la generación de RCD, donde se logró establecer un panorama claro de cómo fue la generación de RCD para la segunda etapa del proyecto, compuesto por 524 unidades de vivienda y para ello se tuvieron en cuenta dos escenarios:

- **Primer escenario:** Basado en la información real proporcionada por la empresa constructora, correspondiente al volumen total de RCD retirado durante la segunda etapa. Además, se incluye el registro de las cantidades de materiales utilizados en la construcción, expresadas en unidades de masa. Este escenario ofrece un enfoque basado en datos históricos y documentados del proyecto.
- **Segundo escenario:** Consiste en la medición directa de muestras en campo de los RCD acopiados en diferentes sitios dentro de la obra. Estas mediciones permiten determinar el volumen de residuos generados durante la segunda etapa como una muestra representativa. Los datos recolectados se emplean para extrapolar y analizar la generación total de RCD en dicha etapa, complementando y validando los resultados del primer escenario.

### 3.3.2 Generación de RCD de la segunda etapa

Para el análisis técnico de la segunda etapa del macroproyecto, se solicitó a la empresa constructora información detallada sobre el volumen de residuos efectivamente retirados, así como los registros de desperdicios reales de materiales clave como cerámicos, concretos, aceros, tuberías y tejas. Esta información, sumada a los datos de consumo real y presupuestado, permitió aplicar la misma metodología utilizada en la primera etapa para la caracterización de los residuos generados, permitiendo así calcular el peso total de RCD asociados a esta fase del proyecto.

El cruce de los datos obtenidos por ambos métodos: análisis documental y medición directa, permitió realizar una comparación integral con los resultados de la primera etapa. El objetivo de

esta correlación fue establecer si los índices de generación de residuos por metro cuadrado construido se mantienen consistentes entre ambas etapas del proyecto, a fin de evaluar la coherencia del comportamiento de generación de RCD en el proyecto.

### 3.3.3 Piloto de medición de la segunda etapa

Para poder cuantificar el volumen de RCD y caracterizar los residuos predominantes, se desarrollaron las siguientes actividades:

#### **A. Visitas al proyecto**

Al momento de iniciar el estudio de caso, la segunda etapa del macroproyecto se encontraba en fase inicial de construcción de las 524 unidades de vivienda. Con el propósito de obtener información precisa y representativa sobre la generación de los RCD, se estableció un cronograma de visitas técnicas alineado con la programación de obra, lo cual permitió hacer seguimiento a las principales actividades generadoras de residuos durante el avance físico del proyecto.

La planificación de estas visitas tuvo como objetivo principal caracterizar de manera directa los tipos de RCD predominantes, su volumen, punto de generación y condiciones de acopio, elementos importantes para el desarrollo de un diagnóstico confiable. Para ello, se gestionó ante la empresa constructora la autorización formal para el ingreso a la obra, cumpliendo con todos los requerimientos establecidos por la normativa de seguridad y salud en el trabajo, tales como la presentación de pólizas de seguro, afiliaciones al sistema de riesgos laborales y el uso del equipo de protección personal completo durante las inspecciones.

#### **B. Frecuencia y duración de las visitas al proyecto**

La frecuencia de las visitas al macroproyecto se definió con base en la información proporcionada por el equipo técnico de obra, quienes indicaron que la recolección de residuos generados se realizaba de forma quincenal. Con el fin de capturar datos representativos y actualizados, se acordó con la dirección de obra programar las visitas de inspección el primer y el quince día de cada mes. Este cronograma permitió realizar las

mediciones justo antes del retiro de los residuos, asegurando que la información recopilada reflejara con mayor precisión el volumen real de RCD acumulado en obra.

Las mediciones en campo se llevaron a cabo en dos jornadas durante cada visita: una primera toma de datos a media mañana, ya que en las primeras horas del día el personal de obra se encuentra realizando labores de limpieza y acopio, lo que dificultaría capturar el total de los residuos generados; y una segunda medición al finalizar la jornada laboral, con el fin de validar y complementar los datos registrados inicialmente.

Las visitas de inspección se mantuvieron alineadas con la programación de obra y se extendieron durante un período aproximado de tres meses, tiempo correspondiente al desarrollo de la segunda etapa del proyecto. En total se realizaron siete visitas técnicas, cada una con una duración de aproximadamente nueve horas, desde las 7:00 am hasta las 4:30 pm. Durante estas jornadas se ejecutaron actividades de observación directa, medición volumétrica de los residuos acopiados y registro fotográfico de los puntos de acopio y del estado general de avance físico del proyecto.

El objetivo de estas visitas fue identificar el manejo actual de los RCD en obra, determinar la ubicación de los puntos de acopio, caracterizar los residuos acumulados y analizar las prácticas asociadas a su gestión. A partir de este trabajo de campo, fue posible identificar las principales actividades generadoras de residuos en el macroproyecto, siendo estas la construcción de muros del primer y segundo piso, la fundición de losas de entrepiso y la ejecución de muros en la cubierta. Dado que el proyecto se enmarca dentro de la categoría de vivienda de interés prioritario (VIP), se evidenció que la fase de acabados no representa una fuente significativa de generación de RCD, por lo cual el análisis se centró principalmente en las fases de estructura.

### **C. Formatos utilizados**

Para el registro de los residuos generados durante el proceso constructivo, se emplearon plantillas de campo desarrolladas a partir del modelo propuesto por: Armijos, adaptadas a las características particulares del macroproyecto. Estas plantillas fueron diseñadas con el propósito de garantizar una recopilación sistemática, precisa y trazable de la información, facilitando así el posterior análisis técnico de los datos.

De acuerdo con las Figuras 9 y 10, la estructura del formato contempló los siguientes componentes clave:

- **Información general:** Se registró la información propia del proyecto, tal como nombre, sistema constructivo, número de pisos, uso de la edificación, tiempo de ejecución, fecha y hora del diligenciamiento.
- **Actividades de obra:** Se identificaron las principales actividades generadoras de RCD, tales como excavaciones, fundición de concretos, levantamiento de muros en mampostería, instalación de redes hidrosanitarias y colocación de enchapes. Para cada actividad se determinó el tipo específico de residuo generado, la cantidad ejecutada en obra y su unidad de medida correspondiente.
- **Generación de residuos:** Se tomó como base a la normativa NTC 6422 del 2017 para la clasificación de los RCD y en función de ella, se identificaron los tipos de residuos que se encontraban presentes en el proyecto. Aunque sólo se realiza disposición final, el formato permite clasificarlos como: aprovechables como agregados, aprovechables en otros usos y residuos no aprovechables.
- **Determinación de volúmenes:** Se realizó una medición detallada de cada uno de los puntos de acopio permanentes y teniendo en cuenta que las pilas de residuos presentaban formas irregulares, fue necesario utilizar ecuaciones geométricas que permitieran obtener un valor representativo del volumen total.

El procedimiento consistió en tomar múltiples mediciones de parámetros físicos como la altura, la longitud de la base, la longitud total de la pila y el ancho de la corona. Posteriormente, se calculó un valor promedio para cada uno de estos parámetros con el fin de minimizar el margen de error asociado a la variabilidad en la forma de los acopios.

### Caracterización de la generación de la segunda etapa

Fecha (DD / MM / AAAA): \_\_\_\_\_ Hora (HH:MM) \_\_\_\_\_

Diligenció: \_\_\_\_\_

#### Información General

Nombre del proyecto	Uso de la edificación	Sistema constructivo
Superficie a construir	Número de pisos	Tiempo de ejecución

Actividades de obra	Desde (DD / MM / AAAA)	Hasta (DD / MM / AAAA)	
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	
Excavaciones			
Concretos			
Muros en mampostería			
Redes internas hidrosanitarias			
Enchapes			
Otros (Especificar)			

#### Generación de residuos

Tipos de residuos	Subcategoría				
Residuos aprovechables como agregados de construcción	Rb	Rc	Ru	Rc + Ru	Otros
Residuos aprovechables en usos diferentes	Papel	Cartón	Plástico	Metal	Madera
Residuos no aprovechables y peligrosos	Contaminados		Peligrosos		Otros

*Figura 9. Formato de cuantificación de RCD*



Variables:

H: altura promedio de la pila

B: ancho promedio de la base de la pila

L: largo promedio de la base de la pila

b: ancho promedio de la corona de la pila

l: largo promedio de la corona de la pila

Cálculos aproximados del volúmen:

Área de la base

$$Ab: B * L$$

Área de la corona

$$Ac: b * l$$

Volúmen de la pila

$$V: \frac{1}{3} H (Ab + Ac + \sqrt{Ab * Ac})$$

Subcategoría	H(m)	B(m)	L (m)	b (m)	l (m)	Ab (m <sup>2</sup> )	Ac (m <sup>2</sup> )	V (m <sup>3</sup> )
Rb								
Rc								
Ru								
Ru+Rc								
Rc+Rb+Otros								
Otros								

Rc: concreto, productos de concreto, mortero y bloques de concreto

Rb: ladrillos de cerámica, tejas, fachaletas, cerámicos

Ru: Agregados naturales, agregados sucios con cementantes (sin mortero)

Rc+Rb+Otros: Material contaminado, mezcla de Rc, Rb, otros

Figura 10. Formato para cuantificación de volumen de RCD. Fuente: Armijos

#### D. Descripción de las mediciones en obra

La información obtenida durante el levantamiento de datos fue registrada de manera sistemática en los formatos previamente mencionados. Esta recolección se llevó a cabo mediante recorridos que fueron detallados por toda el área del proyecto, permitiendo una cobertura completa de los puntos de generación y acopio de residuos.

Cada registro incluyó información específica y contextualizada, como la fecha de recolección, ubicación exacta del residuo (identificando zonas de corte, zonas de acopio por frente de construcción), y el estado de avance constructivo de la estructura en la que se encontraba. Asimismo, se detalló el tipo de residuo y la actividad constructiva asociada a su generación.

- **Medidas de los acopios:** Para determinar el volumen de RCD generado, se identificaron y caracterizaron los acopios permanentes presentes en obra. Se realizaron mediciones de las dimensiones representativas de los acopios, con el fin de calcular su volumen utilizando las fórmulas geométricas.
- **Ubicación:** Debe corresponder a la localización exacta del residuo medido, en especial en zonas de acopios temporales o zonas corte de mampostería, tal como se ilustra en la Figura 11:



*Figura 11. Acopio de la zona de corte de mampostería*

- **Composición del residuo:** Para los residuos de la categoría “Contaminado” que se ilustra en la Figura 12, se identificó la composición del residuo para determinar su uso potencial como residuo aprovechable o como no susceptible de aprovechamiento.



*Figura 12. Residuo contaminado*

#### **E. Recolección de la información**

Los datos de generación de RCD recolectados durante cada visita fueron vinculados directamente con las actividades constructivas ejecutadas en la obra. Para establecer esta relación, se recopiló y analizó información proveniente de las planillas de obra, las cantidades de obra presupuestadas y los informes de ejecución del proyecto.

A partir de este análisis, se determinaron las cantidades efectivamente ejecutadas por actividad, lo cual permitió correlacionarlas con los volúmenes de RCD estimados en campo. Esta correlación fue clave para el desarrollo de los indicadores de generación, tanto volumétricos como gravimétricos, que permiten evaluar el desempeño del proyecto en términos de gestión de residuos.

La empresa constructora indicó que su unidad base de análisis y control es la unidad de casa, lo cual facilitó el procesamiento, interpretación y análisis de los datos extraídos de presupuestos, actas de pago y reportes de ejecución. Durante el proceso de levantamiento de la información, se identificaron las actividades constructivas con mayor incidencia en la generación de RCD. A estas se les asignó un seguimiento más detallado, con el objetivo de establecer patrones de generación y priorizar estrategias de aprovechamiento específicas en función de su impacto.

### 3.3.4 Masas Unitarias

Para la determinación de las masas unitarias de cada RCD se realizó la siguiente metodología:

**a. Selección del recipiente**

Se seleccionó un recipiente cilíndrico de paredes rígidas (como un balde plástico o metálico), que tuviera una forma y tamaño apropiados para permitir un manejo adecuado en campo, así como para contener una cantidad representativa del residuo a evaluar.

**b. Determinación del volumen del recipiente**

Para conocer el volumen exacto del recipiente, se llenó completamente con agua hasta el nivel superior (enrasado), asegurándose de que no se generara rebosamiento del líquido. Posteriormente, se pesó el recipiente lleno utilizando una báscula digital portátil de precisión, como se ilustra en la Figura 13:



*Figura 13. Masa del recipiente con agua*

Se restó el peso del recipiente vacío (previamente registrado) para conocer el peso neto del agua contenida. Con base en el peso específico del agua a temperatura ambiente (aproximadamente  $1,000 \text{ kg/m}^3$  o  $1 \text{ kg/L}$ ), se aplicó la Ecuación 3:

$$\text{Volumen del recipiente (m}^3\text{)} = \frac{\text{Masa del agua} - \text{Masa del recipiente vacío}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \quad (3)$$

Este valor representó el volumen exacto del recipiente el cual fue de 11 litros y esta información se utilizó posteriormente para determinar la masa unitaria de los residuos.

### c. Toma de muestras de residuos

Se identificaron los diferentes tipos de RCD presentes en el proyecto, según la clasificación previamente definida (por ejemplo, Rb: residuos cerámicos, Rc: residuos de concreto, Rc+Rb+Otros: residuos combinados).

Para cada tipo de residuo, se seleccionaron muestras representativas aleatorias, garantizando que la muestra reflejara fielmente el estado en que se encuentra el material en obra (fragmentación, humedad, tamaño, etc.).

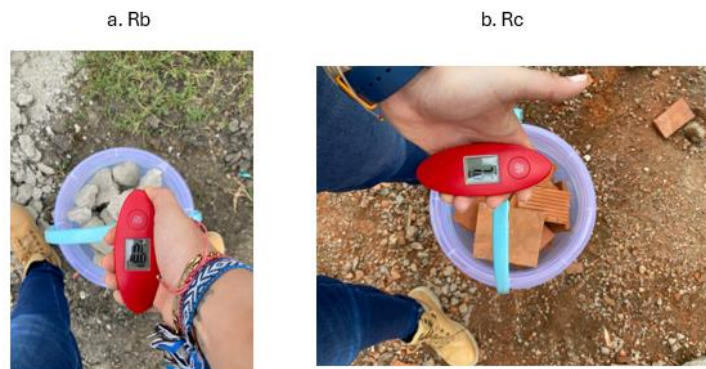
### d. Llenado del recipiente con el RCD

Para cada tipo de residuo:

- Se llenó el recipiente con el material seleccionado, procurando enrasarlo de forma similar al proceso realizado con agua (nivelando el material en la parte superior para que no exceda ni quede por debajo del borde).
- No se compactó el material; se manejó en estado suelto, simulando su disposición típica en obra.

### e. Pesaje del recipiente con el RCD

- Se determinó nuevamente la masa del recipiente ya lleno con el tipo de RCD seleccionado como se ilustra en la Figura 14.
- Se restó el masa del recipiente vacío para obtener la masa neta de la muestra del residuo.



*Figura 14. Masa de los RCD en el recipiente*

#### f. Cálculo de la masa unitaria

Con el volumen del recipiente previamente conocido y la masa neta de la muestra, se calculó la masa unitaria del residuo mediante la Ecuación 4:

$$Masa\ Unitaria\ \left(\frac{Kg}{m^3}\right) = \frac{Masa\ neta\ del\ RCD\ (Kg)}{Volumen\ del\ recipiente\ (m^3)} \quad (4)$$

#### g. Repetición y promedio

Para mayor precisión de los datos, se repitió el procedimiento por mínimo tres veces por cada tipo de residuo y se calculó el promedio de las tres mediciones. Este valor fue el considerado como la masa unitaria para el tipo de RCD.

### 3.3.5 Cantidades de obra ejecutadas

Para obtener los indicadores de generación de RCD es necesario tener claridad sobre el avance físico de la obra, es por ello por lo que es importante procesar y analizar la siguiente información:

- **Presupuesto:** Se encuentra en el software Edificar y permite visualizar de manera eficiente las cantidades de volumen de concreto, unidades de ladrillo, kilogramos de acero, unidades de fichas de enchape, unidades de tubería, volúmenes de excavación, como también los costos asociados a cada actividad.
- **Avance de obra:** Por medio de informes mensuales de costos se obtiene información de los costos asociados al avance de obra, por ejemplo, el costo de desalojo del material proveniente de obras de urbanismo: excavaciones y relleno, como también el costo asociado al retiro y disposición final de los residuos provenientes de las edificaciones. También es posible determinar el porcentaje de avance de cada etapa del proyecto debido a que el área de presupuestos hace entrega de informes de seguimiento y avance del proyecto.

### 3.3.6 Indicadores de generación

Los indicadores de generación de RCD se establecen a partir de relaciones empíricas derivadas del análisis de los datos recolectados durante el proceso de caracterización y medición en campo. Estos indicadores permiten cuantificar la relación entre el volumen de RCD generado o la masa de RCD

y el área construida del proyecto, expresándose como una proporción que facilita la proyección de residuos en futuras etapas o proyectos similares.

Dichos indicadores, tanto volumétricos como gravimétricos, reflejan el comportamiento real de la obra y son resultado de un seguimiento a las principales fases constructivas: excavación, estructura y acabados. Su utilidad radica en que permiten establecer patrones de generación que pueden ser replicables o adaptables en proyectos con características constructivas semejantes.

Es importante destacar que estos indicadores son directamente proporcionales al área edificada, es decir, a mayor área de intervención, mayor será la cantidad de residuos generados. Para el desarrollo del proyecto de grado se tuvo en cuenta los indicadores a gran escala.

Estos son los indicadores más relevantes para el estudio de caso, ya que, representan el comportamiento de generación de RCD de una forma cuantitativa y en función de un análisis estadístico de las variables tenidas en cuenta que son:

- Volumen generado: m<sup>3</sup>
- Masa generada: Ton
- Área construida: m<sup>2</sup>
- Masa total del proyecto: Ton

Con esta información se puede determinar el panorama del proyecto con respecto al cumplimiento de la normativa ambiental vigente, como, por ejemplo, la Resolución 1257 del 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y así poder exponer alternativas para garantizar su cumplimiento. A continuación, se describen los indicadores determinados:

**a. Indicador de Generación Volumétrico por superficie**

Este indicador permite cuantificar la cantidad de RCD generados por cada metro cuadrado de área construida, expresado en unidades de m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Su valor se obtiene a partir de la relación entre el volumen total de RCD medido en campo y el área total construida del proyecto.

$$IGR^V = \frac{VRCD_i}{A_i} \quad (5)$$

Donde:

- IGR<sup>V</sup>: Indicador de generación volumétrico por superficie (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

- VRCD<sub>i</sub>: Volumen de RCD generado en la ventana de seguimiento.
- i: Indica la actividad constructiva de seguimiento, como excavación, estructura, acabados, entre otros.

**b. Indicador de generación gravimétrico por superficie**

Este indicador permite estimar la masa total de los RCD generados por cada metro cuadrado de área construida, expresado en kg/m<sup>2</sup>.

Para su cálculo, se parte del volumen total de residuos generados y se realiza una conversión a unidades de masa, utilizando las masas unitarias obtenidas experimentalmente para cada tipo de RCD. Dado que ya se conoce el porcentaje volumétrico que representa cada tipo de residuo en la generación total, este porcentaje se multiplica por su respectiva masa unitaria (t/m<sup>3</sup> o kg/m<sup>3</sup>). La suma de estas contribuciones permite obtener la masa total de residuos generados, que posteriormente se divide por el área construida para establecer el índice, de acuerdo con la Ecuación 6:

$$IGR^W = \frac{WRCD_i}{A_i} \quad (6)$$

Donde:

- IGR<sup>W</sup>: Indicador de generación gravimétrico por superficie (Kg / m<sup>2</sup>)
- WRCD<sub>i</sub>: Masa del RCD generado en la ventana de seguimiento.
- A<sub>i</sub>: Área construida en la ventana de seguimiento.

**c. Indicadores de generación de RCD por cada etapa construida**

Este indicador representa de manera integral el volumen total de los RCD generados o la masa total de estos residuos, en relación con el área total construida del proyecto. Con este indicador se consolidan los índices de generación obtenidos para cada una de las etapas del proceso constructivo (excavación, estructura y acabados), tomando como referencia las ventanas de seguimiento establecidas durante la ejecución del proyecto.

Dependiendo del enfoque utilizado, este índice puede expresarse en unidades de volumen por metro cuadrado (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) o en unidades de masa por metro cuadrado (kg/m<sup>2</sup>), tal como se indica en la Ecuación 7:

$$IGR^{W \text{ ó } V} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m RCD_i^t}{\text{Área total del proyecto}} \quad (7)$$

Donde:

- t: Representa el contador de ventanas de seguimiento para cada actividad generadora.
- i: Indica la actividad constructiva de seguimiento.

### 3.3.7 Indicadores de aprovechamiento

Estos indicadores permiten medir la eficiencia del proceso de aprovechamiento de los RCD generados durante la construcción de la obra, con ellos se puede evaluar el porcentaje de RCD que está siendo reincorporado al ciclo productivo, ya sea mediante reutilización, reciclaje o transformación, en lugar de ser enviados a disposición final.

Estos indicadores pueden ser expresados de la siguiente manera:

#### a. Por volumen

Se calcula en función del volumen de RCD aprovechados frente al total de RCD generado, como indica la Ecuación 8:

$$IAPRV = \frac{VRCD^+}{VT \text{ RCD}} \times 100\% \quad (8)$$

Donde:

- IAPRV: Indicador de aprovechamiento de RCD.
- VRCD<sup>+</sup>: Volumen de RCD aprovechado.
- VT RCD: Volumen total de RCD generado en obra.

#### b. Por masa

Se calcula en función de la masa total de los residuos aprovechados frente a la masa total de los residuos generados, haciendo uso de la Ecuación 9:

$$IAPRV = \frac{WRCD^+}{WT \text{ RCD}} \quad (9)$$

Con estos indicadores se busca alinear al proyecto para dar cumplimiento con la normativa ambiente vigente, resolución 1257 del 2021 de MADS, así como también visualizar el aprovechamiento como una estrategia para optimizar costos y obtener beneficios adicionales para el proyecto.

### **3.4 Plan de gestión integral de RCD**

La elaboración del Plan de Gestión Integral RCD se desarrolló tomando como base la información específica del macroproyecto de vivienda seleccionado como estudio de caso, alineado con la normativa colombiana vigente, particularmente la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), y la "Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición - RCD en obra" publicada por la Alcaldía de Bogotá en 2021.

Este plan se estructuró mediante las siguientes fases metodológicas:

#### **3.4.1 Diagnóstico inicial del proyecto**

Se realizó un diagnóstico detallado del manejo de RCD dentro del macroproyecto, a partir de la información suministrada por la empresa constructora. Este proceso incluyó entrevistas y reuniones con los profesionales encargados de la obra, así como el análisis de datos provenientes del área de costos y presupuestos. Además, se llevaron a cabo visitas técnicas al interior del proyecto, lo cual permitió observar directamente las prácticas de manejo de residuos y obtener un entendimiento claro del contexto operativo y logístico de la obra.

#### **3.4.2 Caracterización de los RCD**

La caracterización de los RCD generados en el macroproyecto se abordó mediante el análisis de dos etapas constructivas. En la etapa 1, se aplicó una metodología basada en el análisis de los datos de presupuesto y centros de costos proporcionados por la empresa constructora. En la etapa 2, se complementó este análisis con trabajo de campo, recolectando muestras representativas de los residuos generados en obra. Esta doble metodología permitió identificar la tipología, cantidad y potencial de aprovechamiento de los RCD en distintas fases del proyecto. Los detalles técnicos de este proceso se encuentran desarrollados en los numerales 3.2 y 3.3 del presente documento.

### 3.4.3 Diseño de estrategias de gestión

Con base en el diagnóstico inicial y la caracterización de los RCD, se definieron e implementaron estrategias de gestión específicas dentro del plan:

- **Minimización en la fuente:** acciones desde el diseño y planificación de la obra para reducir la generación de residuos.
- **Separación en la fuente:** clasificación diferenciada de residuos aprovechables y no aprovechables directamente en el lugar de generación.
- **Almacenamiento temporal:** establecimiento de puntos estratégicos para acopio transitorio, que faciliten la logística de transporte y manejo.
- **Reutilización y reciclaje:** reincorporación de materiales a la misma obra o transformación para otros usos constructivos.
- **Gestión con operadores autorizados:** identificación y vinculación de gestores de residuos debidamente certificados por la autoridad ambiental.
- **Disposición final adecuada:** para aquellos residuos no susceptibles de aprovechamiento, asegurando trazabilidad y cumplimiento normativo.

### 3.4.4 Indicadores de seguimiento y control

Con el fin de evaluar el cumplimiento y la eficacia del plan, se estableció la obligación de generar informes mensuales de gestión de RCD, en línea con lo establecido en la Resolución 0472 de 2017 y la Resolución 1257 de 2021 del MADS.

Asimismo, se incorporaron los siguientes indicadores clave de desempeño:

- **Indicador de eficiencia:** compara la inversión real frente a la estimada para la gestión de los RCD, por medio de la Ecuación 10:

$$I.E = \frac{\text{Gastos mensuales de la implementación del PG}}{\text{Presupuesto planeado para el PG}} \times 100 \quad (10)$$

- **Indicador de eficacia:** mide el volumen de residuos efectivamente aprovechados respecto al total generado, por medio de la Ecuación 11:

$$I.Ef = \frac{\text{Volumen de residuos aprovechados en obra por mes}}{\text{Volumen de material utilizado en obra}} \times 100 \quad (11)$$

- **Indicador de efectividad:** permite monitorear la proporción de residuos que fueron enviados a disposición final, con el objetivo de reducir esta cifra progresivamente, para ello se utiliza la Ecuación 12:

$$I.Efe = \frac{\text{Volumen de RCD llevado a disposición final por mes}}{\text{Volumen de RCD generado al mes}} \times 100 \quad (12)$$

Estos indicadores permiten implementar un sistema de mejora continua en la gestión de RCD, garantizando un enfoque sostenible, trazable y en conformidad con la normatividad ambiental vigente.

### 3.5 Evaluación económica: incorporación del plan de gestión de RCD

La evaluación económica tuvo como propósito comparar dos escenarios con el fin de analizar el impacto financiero derivado de distintas estrategias de gestión de los RCD en el marco del proyecto. El primer escenario contempló la continuidad de las prácticas actuales, centradas exclusivamente en la disposición final de los residuos, mientras que el segundo integró los costos asociados a la posible implementación de un plan de gestión integral de RCD, incorporando las estrategias de aprovechamiento más coherentes con las características técnicas y operativas del proyecto. Ambos escenarios se estructuraron a partir de los indicadores de generación previamente calculados, con proyecciones específicas para la tercera etapa del macroproyecto.

#### 3.5.1 Estrategias de aprovechamiento

Para definir las estrategias de aprovechamiento viables y alineadas con las condiciones reales del proyecto, se estructuró un proceso metodológico que integró la revisión documental, el análisis técnico de obra y la caracterización de los residuos generados durante el proceso constructivo.

El primer paso consistió en realizar una revisión del estado del arte, con el fin de identificar experiencias previas, casos de éxito y prácticas aplicadas en proyectos similares, tanto a nivel nacional como internacional. Esta revisión permitió recopilar un conjunto de estrategias reconocidas para el aprovechamiento de RCD, clasificadas según su nivel de complejidad técnica, requerimientos operativos, condiciones de manejo y aplicación potencial en obra.

Posteriormente, se realizó un cruce de esta información con los datos obtenidos en campo, específicamente con los tipos de residuos generados, sus características físicas y las condiciones logísticas del proyecto (acopios, separación en la fuente, transporte interno, etc.). Esto permitió filtrar y descartar aquellas estrategias que, si bien eran técnicamente viables en otros contextos, no eran aplicables a la realidad operativa de la obra ni a las capacidades de la empresa constructora.

Como parte del análisis, se establecieron criterios de selección técnica y económica, tales como:

- Volumen potencial del residuo disponible para aprovechamiento
- Nivel de transformación requerido.
- Equipos, herramientas o procesos necesarios para su incorporación.
- Posibilidad de uso del residuo dentro del mismo proyecto.
- Impacto ambiental, ahorro de materiales y reducción de costos.
- Cumplimiento normativo y viabilidad de implementación a corto plazo.

Con base en estos criterios, se priorizaron aquellas estrategias que no requieren grandes transformaciones del residuo, que pueden ser aplicadas con recursos y maquinaria disponibles en obra, y que presentan beneficios técnicos, económicos y ambientales demostrables.

### 3.5.2 Evaluación económica de la gestión de los RCD

Al conocer cuáles son las estrategias de aprovechamiento planteadas para el proyecto del estudio de caso y haber formulado el plan de gestión integral de RCD alineado con las características y capacidades de la empresa constructora, se procedió a realizar la evaluación económica de los siguientes escenarios para la tercera etapa del proyecto:

#### a. **Disposición final**

En la actualidad, la empresa constructora gestiona los residuos de construcción y demolición (RCD) generados en el proyecto a través de la disposición final, sin

implementar estrategias de separación en la fuente ni de aprovechamiento. Esta práctica implicó asumir la totalidad de los costos asociados al cargue, transporte y disposición de los residuos en sitios autorizados por la autoridad ambiental competente.

Para la evaluación económica de este escenario se proyectaron los costos con base en el volumen estimado de RCD que se generará en la tercera etapa del macroproyecto, considerando el comportamiento identificado en las etapas anteriores. Adicionalmente, se incluyeron los costos asociados al suministro de material granular tipo roca muerta, utilizado actualmente en la conformación de terrazas para cimentación, sin ningún tipo de sustitución con materiales reciclados.

Es importante aclarar que, en el segundo escenario, se planteó la incorporación de residuos cerámicos reciclados en la mezcla de este material, lo cual se fundamentó en los hallazgos de la revisión de la literatura presentada en el capítulo 2.5. Esta estrategia permitió proyectar una reducción del 20% en el volumen total de roca muerta requerida. Por tanto, para garantizar una comparación equitativa entre los dos modelos, fue indispensable mantener este volumen completo de suministro en el escenario base (sin aprovechamiento), reflejando el costo total que implicaría continuar con el modelo tradicional.

Este análisis permitió determinar no sólo el costo asociado a mantener las prácticas actuales en la tercera etapa, sino también proyectar el impacto económico acumulado de esta estrategia si se implementara de forma continua en las etapas restantes del macroproyecto.

**b. Aprovechamiento del residuo limpio de la zona de corte**

En este escenario se plantea una alternativa de bajo impacto operativo, que considera únicamente el aprovechamiento del residuo cerámico no contaminado, generado en la zona de corte del ladrillo. Este tipo de residuo, al no estar mezclado con otros materiales, puede ser incorporado directamente en actividades constructivas sin requerir procesos adicionales de tratamiento o separación.

A diferencia del tercer escenario, no se incluyen costos asociados a: contratación de personal adicional, capacitación en gestión de residuos, adecuación de zonas de acopio.

El objetivo de este escenario es determinar si, aun con una intervención mínima, es posible alcanzar un beneficio económico frente a la práctica actual, aprovechando un recurso que ya se encuentra disponible y con un alto potencial de reincorporación en obra.

### **c. Incorporación de plan de gestión integral y las estrategias de aprovechamiento**

Este escenario evaluó el impacto económico de la posible implementación del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), con el objetivo de reducir la presión sobre los sitios de disposición final y optimizar el uso de recursos dentro del macroproyecto. Se consideró la estrategia de aprovechamiento del residuo cerámico (Rb) como reemplazo parcial del material granular tipo roca muerta utilizado en la conformación de las terrazas de cimentación de las viviendas, como también estrategias de reutilización o reciclaje para los diferentes tipos de residuos identificados en la obra con potencial de aprovechamiento.

La estrategia principal contempló una sustitución del 20% del volumen de roca muerta por residuo cerámico recuperado en obra, previamente clasificado como no contaminado. Para poder viabilizar esta implementación, se tuvieron en cuenta los costos asociados a la logística y operación en obra, entre los que se incluyeron:

- Mano de obra adicional operativa requerida para verificar la correcta separación en la fuente, asegurar que los residuos susceptibles de aprovechamiento no se mezclen con otros materiales contaminados y ejecutar las actividades de preparación y mezcla del residuo cerámico con el material granular tipo roca muerta.
- Costos de maquinaria y equipos, derivados de los rendimientos de cargadores, retroexcavadoras y compactadores, necesarios para el manejo y mezcla de los materiales.
- Capacitaciones al personal de obra, enfocadas en la normativa vigente (Resolución 1257 de 2021), principios de economía circular y procedimientos operativos del plan de gestión. A esta actividad se le asignó un costo estimado por sesión, con base en las jornadas programadas y el número de asistentes por rol.
- Adecuación de zonas de almacenamiento temporal (SAT), necesarias para clasificar, almacenar y preparar los RCD aprovechables. Se calcularon los costos asociados a la construcción, señalización, cubiertas, y elementos de control ambiental y sanitario de estos espacios.

A pesar de que este escenario contempla nuevos costos operativos, también incluyó una reducción proporcional del 20% en la compra de material granular (roca muerta).

Adicionalmente, se proyectó una disminución progresiva de los costos de disposición final, en la medida en que se optimiza el aprovechamiento de los residuos generados.

Este modelo buscó no sólo el cumplimiento normativo, sino también fortalecer el compromiso ambiental de la empresa, generar ahorros a mediano plazo y sentar las bases para una gestión sostenible de residuos replicable en futuras etapas del macroproyecto.

## **4 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD**

La caracterización de los residuos de construcción y demolición (RCD) se desarrolló conforme a los lineamientos establecidos en la metodología del estudio. En una primera etapa, se trabajó con la información proveniente del presupuesto de obra y de las actividades ya ejecutadas, lo cual permitió realizar una clasificación preliminar de los residuos predominantes asociados a la construcción de vivienda. No obstante, con el objetivo de profundizar en el entendimiento del proceso de generación, manejo, tratamiento y composición de los RCD, se implementó un plan piloto de medición durante la ejecución de la segunda etapa del proyecto.

Es importante señalar que, en esta caracterización, no se consideraron los residuos derivados de actividades de excavación. Esto se debe a que la empresa constructora clasifica de manera diferenciada el volumen de los residuos generados directamente en la construcción de vivienda, respecto de aquellos provenientes de obras de urbanismo como excavaciones, rellenos y movimientos de tierra. Por tanto, el material de excavación fue excluido de la clasificación general de RCD analizada en este estudio

El desarrollo del plan piloto permitió obtener datos de campo precisos que sirvieron de base para la determinación de las masas unitarias de los residuos identificados y el cálculo de los indicadores de generación y aprovechamiento. Estos resultados fortalecen técnicamente el análisis y brindan aspectos clave para la formulación de estrategias de gestión sostenible de RCD en el marco del proyecto.

### **4.1 Generación de RCD en la primera etapa**

Al momento de iniciar el estudio de caso la primera etapa ya se encontraba construida, sin embargo, la empresa constructora facilitó información detallada del presupuesto, incluyendo las cantidades realmente ejecutadas y los costos asociados a su construcción. Esta información, complementada con las visitas técnicas al proyecto, permitieron realizar un diagnóstico integral de la gestión de los RCD en esta etapa.

#### 4.1.1 Diagnóstico de la gestión de los RCD

Durante el período de reconocimiento en obra, que se extendió aproximadamente por tres meses, se evidenciaron oportunidades de mejora en la gestión de los RCD en el macroproyecto objeto de estudio. A pesar de que la empresa constructora ha dispuesto zonas específicas para el acopio de residuos clasificados bajo categorías generales como escombros, madera, plástico y chatarra, en la práctica no se ejecutan procesos de separación en la fuente de forma efectiva.

Las visitas permitieron constatar que los espacios destinados para el almacenamiento temporal de los residuos no cuentan con las dimensiones ni la infraestructura adecuada para evitar la contaminación cruzada entre materiales, lo cual imposibilita su posterior aprovechamiento. Asimismo, se identificó una ausencia de cultura organizacional y de buenas prácticas por parte del personal de obra en cuanto a la gestión diferenciada de los residuos.

En particular, se observó que la categoría denominada “escombros” se ha convertido en un contenedor general en el que se depositan residuos como concreto, cerámica, tuberías, elementos plásticos, restos de equipos de protección personal y otros materiales no clasificados. Esta práctica compromete gravemente la posibilidad de recuperación de materiales potencialmente aprovechables y refleja la ausencia de implementación de protocolos alineados con la normativa ambiental vigente. Otra de las prácticas generalizadas consiste en que los residuos generados durante el día son dejados frente a las viviendas en construcción, tal como se evidencia en la Figura 15 y posteriormente, son recolectados por un minicargador y transportados a los puntos de acopio ya mencionados. La única excepción identificada corresponde a los residuos plásticos, los cuales sí se separan para su entrega a una fundación que les da un uso social.



*Figura 15. Acopio de residuos en los frentes de las viviendas*

Los residuos generados en la obra son finalmente transportados hacia un sitio de disposición final conocido como “El Cortijo”, ubicado a unos 2 km del casco urbano del municipio de Puerto Tejada. No obstante, investigaciones recientes han evidenciado que dicho sitio no cumple con los requisitos establecidos por la autoridad ambiental competente y ha sido señalado por afectaciones al ecosistema y a la salud de las comunidades aledañas, debido al incumplimiento de normas técnicas y de licenciamiento ambiental (Sánchez & Valencia, 2021).

Este diagnóstico pone en evidencia una gestión inadecuada de los RCD, que no solo desconoce las obligaciones establecidas por normativas como la Resolución 1257 de 2021 del MADS, sino que también representa un riesgo ambiental y social significativo. Bajo este contexto, se hace imperativo avanzar hacia una transición que permita minimizar el volumen de residuos que se destina a disposición final, mediante la implementación de estrategias de separación, clasificación y aprovechamiento in situ.

#### 4.1.2 Cuantificación de la generación de los RCD

Con base en la información suministrada por la empresa constructora correspondiente a la primera etapa del proyecto, fue posible identificar el volumen total de residuos retirados y trasladados a disposición final, tal como se ilustra en la Tabla 8:

<b>Unidades de vivienda</b>	<b>Cant de retiro m<sup>3</sup></b>	<b>Vr / m<sup>3</sup></b>	<b>Vr actividad</b>	<b>m<sup>3</sup>/ casa</b>	<b>Vr / casa</b>
		\$	\$		\$
260	1,124	38,451	43,218,924	4.32	166,227

*Tabla 8. Volumen de RCD retirado en la primera etapa*

Durante la construcción de las 260 unidades de vivienda se generó un volumen total de 1,124 m<sup>3</sup> de RCD, lo que representó un costo asociado de \$38,451. Este valor contempla las actividades de cargue, retiro y disposición final en un sitio autorizado. Sin embargo, al disponer de la información sobre el volumen total de residuos generados y las áreas construidas por unidad de vivienda, es posible calcular un indicador clave para conocer la generación de RCD por cada metro cuadrado construido, para ello se realizó la Tabla 9:

<b>Vol total</b>	<b>Área x casa</b>	<b>Cant casas</b>	<b>Área construida</b>	<b>Índice</b>
1,124 m <sup>3</sup>	51.92 m <sup>2</sup>	260	13,499.20 m <sup>2</sup>	0.08

*Tabla 9. Indicador de generación de RCD por m<sup>2</sup> construido – primera etapa*

Por cada metro cuadrado construido en la primera etapa, se generaron aproximadamente 8 cm de RCD, lo que corresponde a un índice de generación de 0.08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Este indicador permite realizar proyecciones futuras sobre el volumen estimado de RCD en etapas posteriores del proyecto, facilitando una mejor planificación de recursos y estrategias de gestión.

Adicionalmente, se observó que en la fase de presupuestos la empresa constructora estimó una generación de RCD basada en un índice de 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, equivalente a un volumen total proyectado de 1,507 m<sup>3</sup> de RCD, al constatar esta proyección con el volumen total generado de 1,124 m<sup>3</sup>, se evidencia una diferencia del 25.4%, lo que representa un sobredimensionamiento en la estimación inicial. La variación entre el índice de generación real de la primera etapa y el índice de generación presupuestado se explica, en gran medida, por la metodología empleada por la empresa constructora para su estimación. Actualmente, la proyección de RCD se realiza a partir de indicadores empíricos obtenidos en proyectos ejecutados previamente, considerando el tipo de sistema constructivo y el área construida, es decir, se aplica una relación estándar basada en el comportamiento observado en obras similares.

Estos indicadores han sido recopilados a lo largo del tiempo como resultado de la ejecución de diferentes tipos de proyectos, lo que ha permitido a la empresa construir una base de datos interna

para orientar sus presupuestos. No obstante, esta práctica, aunque útil como referencia general, puede no reflejar con exactitud las condiciones particulares de cada obra.

Ahora bien, el volumen de residuos generados por unidad de vivienda está conformado por los desperdicios de diversos materiales empleados durante el proceso constructivo, tales como ladrillo, cemento, acero, tuberías, tejas y enchapes. En la Tabla 10 se presenta un resumen de los materiales predominantes utilizados durante la fase de estructura, junto con las cantidades realmente adquiridas y ejecutadas para cada uno.

A partir de esta información, se calculó el porcentaje de desperdicio para cada material, resultado de la diferencia entre las cantidades compradas y las efectivamente consumidas en la construcción. Posteriormente, se consultaron fuentes técnicas y fichas de producto para determinar el peso específico de cada tipo de material, lo cual permitió transformar el volumen de desperdicio en masas equivalentes.

Material	Unidad	Und teóricas	Consumo real	% Desp	Cant sobrante	Peso esp (Kg)	Peso (Ton)	% incidencia
Ladrillos	bloque	451,450	543,787	20.45%	92,337	5.4	498.62	<b>56.9%</b>
Concreto	m <sup>3</sup>	1,890.77	2,028	7.28%	138	2,400	330.46	<b>37.7%</b>
Aceros	kg	177,969	184,020	3.40%	6,051	1	6.05	<b>0.7%</b>
Tuberías	tubo	18,017	18,978	5.33%	961	1.24	1.19	<b>0.1%</b>
Cemento	saco	9,924	10,645	7.27%	721	50	36.07	<b>4.1%</b>
Cerámica	m <sup>2</sup>	2,010	2,283	13.57%	273	13.34	3.64	<b>0.41%</b>
Tejas	und	4,200	4,245	1.07%	45	21.66	0.97	<b>0.1%</b>
<b>Subtotal</b>							<b>877</b>	
<b>Cant / casa</b>							<b>3.37</b>	

*Tabla 10. Desperdicios del presupuesto para la primera etapa*

La mampostería es el material que registra el mayor porcentaje de incidencia, representando un 56.9% del peso total de los residuos. Estas pérdidas están mayormente relacionadas con las actividades de corte de ladrillos, así como con la manipulación y traslado del material dentro de la obra, lo que genera fragmentación y sobrantes que no pueden ser reutilizados en la construcción. Se identificó que los bloques de patio y el bloque viga presentan los niveles más altos de desperdicio, con rangos entre el 40% y 50%, debido a su alta fragilidad, el personal de obra manifestó que dichos materiales, al momento de su recepción en campo, ya presentan fracturas

parciales, lo que limita su aprovechamiento y aumenta la cantidad de residuos desde el inicio de la cadena productiva.

En segundo lugar, el concreto evidencia una participación del 37.7% en el peso total de los residuos, cifra atribuida principalmente a deficiencias operativas durante el proceso de fundición. Se reportaron ineficiencias en las actividades de vaciado de escaleras y cuchillas de cubierta, dado que la configuración geométrica de las viviendas dificulta el correcto manejo de la formaleta y limita los accesos, lo que incrementa la cantidad de desperdicio. Adicionalmente, se identificaron malas prácticas durante el transporte y la programación del concreto, en diversas ocasiones, al momento de la fundición de elementos estructurales por medio del uso de la retroexcavadora, las cuadrillas no se encontraban listas para fundir, lo que ocasionó que parte del material no fuera utilizado oportunamente y tuviera que ser vertido como residuo en zonas aisladas de la obra. Esta situación refleja no solo una pérdida de material sino también una deficiencia en la coordinación logística, con impactos económicos y ambientales significativos.

No obstante, es importante destacar que estos porcentajes de desperdicio de materiales no necesariamente se traducen en la misma magnitud de generación de residuos de construcción y demolición (RCD). Es decir, aunque el cemento presenta un porcentaje de incidencia del 4.1% en el peso de los residuos, esto no implica que todo el material haya sido efectivamente utilizado en las actividades constructivas de la vivienda. Factores como pérdidas en el almacenamiento, endurecimiento del material o su uso en otras actividades no contempladas en el presupuesto original pueden incrementar los valores reportados sin que ello represente residuos directamente atribuibles a la construcción.

Debido a esta incertidumbre en la caracterización de los RCD en la primera etapa, no es posible determinar con precisión qué categoría de residuos es predominante ni los porcentajes de incidencia de cada material. Por esta razón, se vuelve esencial la realización de mediciones en campo durante la segunda etapa del proyecto, con el objetivo de identificar con mayor exactitud las categorías de RCD predominantes, sus porcentajes de incidencia y su relación con las actividades constructivas. Con esta información, se podrá generar un escenario más realista para la primera etapa.

## 4.2 Análisis de la generación de la segunda etapa

El inicio de la segunda etapa del proyecto coincidió con el desarrollo del estudio de caso, lo cual representó una oportunidad clave para llevar a cabo un análisis detallado sobre la generación y gestión de los RCD. Esta simultaneidad permitió no solo realizar un diagnóstico preciso de la clasificación de los RCD predominantes en el proyecto, sino también evaluar la gestión que se estaba implementando en obra.

Para tal fin, se analizó la información suministrada por la empresa constructora incluyendo presupuestos, cantidades ejecutadas y registros operativos, en conjunto con los datos obtenidos a partir del plan piloto de medición desarrollado en campo. Este ejercicio permitió construir una radiografía técnica de la segunda etapa del proyecto, en la cual se identificaron las prácticas reales de manejo de residuos y se estableció una muestra representativa de los RCD generados durante la ejecución de las 524 unidades de vivienda. Gracias a esta caracterización, se logró obtener información clave para la formulación de indicadores de generación, clasificación por tipología de residuo y lineamientos estratégicos para su posible aprovechamiento dentro del proyecto.

### 4.2.1 Información de generación total para la segunda etapa

Cuando culminó la construcción de las 524 unidades de vivienda de la segunda etapa, la empresa constructora suministró la información referente al volumen total retirado y llevado a disposición final, con esta información se realizó un comparativo del volumen de residuos generados en la primera y segunda etapa, tal como se ilustra en la Tabla 11:

<b>Vol E1</b>	<b>Casas E1</b>	<b>Vol / casa</b>	<b>Vol E2</b>	<b>Casas E2</b>	<b>Vol / casa</b>
1,124 m <sup>3</sup>	260	4.32	2,296 m <sup>3</sup>	524	4.38

*Tabla 11. Volumen de residuos retirados de la segunda etapa*

Para la segunda etapa del proyecto se determinó un factor de generación de residuos de 4.38 m<sup>3</sup> por vivienda, con un costo asociado de \$168,480 por vivienda. Al contrastar estos resultados con los obtenidos en la primera etapa donde se estableció un factor de 4.32 m<sup>3</sup> por unidad de vivienda, se evidencia una correlación significativa entre ambas etapas, con una variación porcentual del 1.2%. Es importante destacar que esta ligera diferencia puede atribuirse a las variaciones en las

áreas construidas por unidad de vivienda en cada etapa. En la primera etapa, cada unidad contaba con un área promedio de 51.92 m<sup>2</sup>, mientras que para la segunda etapa se manejó un área ponderada de 50.04 m<sup>2</sup>, resultado de la combinación de 336 unidades con un área de 51.92 m<sup>2</sup> y 188 unidades con un área de 46.69 m<sup>2</sup>.

Teniendo el volumen total generado de residuos y el área total construida, es posible construir la Tabla 12 para conocer el índice de generación de residuos por metro cuadrado construido para la segunda etapa:

<b>Vol total</b>	<b>Área x casa</b>	<b>Cant casas</b>	<b>Área construida</b>	<b>Índice</b>
2,296 m <sup>3</sup>	50.04 m <sup>2</sup>	524	26,222.84 m <sup>2</sup>	0.09

*Tabla 12. Índice de generación de la segunda etapa*

Esta vez se obtuvo un índice de generación de residuos de 0.09 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, lo que representa un incremento del 12.5% respecto al índice registrado en la primera etapa (0.08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), es decir, un aumento equivalente a 1 cm de residuos por cada metro cuadrado construido. Esta variación puede estar asociada a varios factores, entre ellos, la escala del proyecto: la segunda etapa contempla casi el doble de unidades de vivienda en comparación con la primera, lo cual dificulta el control y la supervisión eficiente del uso de materiales. Adicionalmente, se debe considerar que en la primera etapa se evidenció un alto porcentaje de desperdicio en la mampostería, principalmente por la fragilidad de los materiales (bloques viga y bloques de patio), fenómeno que, al repetirse a mayor escala, genera un incremento proporcional en el volumen total de residuos.

En la primera etapa se identificó que la mampostería fue el material con mayor incidencia en el peso total de los residuos generados, representando el 56.9%, seguido por el concreto con un 37.7%. Para la segunda etapa se desarrolló la Tabla 13, en la cual se retomaron los materiales empleados en la construcción de las viviendas, considerando tanto las cantidades realmente ejecutadas como las suministradas. A partir de esta información se determinaron los porcentajes de desperdicio por material y posteriormente, se calculó la masa total de residuos generados.

<i>Material</i>	<i>Unidad</i>	<i>Und teóricas</i>	<i>Consumo real</i>	<i>% Desp</i>	<i>Cant sobrante</i>	<i>Peso esp (Kg)</i>	<i>Peso (Ton)</i>	<i>% incidencia</i>
Ladrillos	bloque	987,845	123,7125	25.23%	249,280	5.4	1,346.11	<b>66.2%</b>
Concreto	m <sup>3</sup>	3,095	3,341	7.93%	245	2400	588.77	<b>29%</b>
Aceros	kg	348,676	362,890	4.08%	14,214	14,214	14.21	<b>0.7%</b>
Tuberías	tubo	41,644	43,439	4.31%	1,795	1.24	2.23	<b>0.1%</b>
Cemento	saco	19,377	20,749	7.08%	1,372	50	68.6	<b>3.4%</b>
Cerámica	m <sup>2</sup>	4,692	5,362	14.29%	670	13.34	8.94	<b>0.44%</b>
Tejas	und	8,387	8,536	1.78%	149	21.66	3.23	<b>0.2%</b>
<b>Subtotal</b>							<b>2,032.1</b>	
<b>Cant / casa</b>							<b>3.88</b>	

*Tabla 13. Desperdicios del presupuesto de la segunda etapa*

En la segunda etapa del proyecto se evidencia un comportamiento similar al observado en la primera etapa en cuanto a la composición de los residuos generados, aunque con algunas variaciones significativas en sus proporciones. La mampostería continúa siendo el residuo predominante, representando el 66.2% de la masa total generada, seguida por el concreto con un 29%.

Al analizar los porcentajes de desperdicio, se observa un aumento en ambos materiales. La mampostería presenta un desperdicio del 25.2%, lo que representa un incremento de 4.78 puntos porcentuales frente al 20.45% registrado en la primera etapa. Este aumento podría estar asociado al mayor volumen de producción y a la manipulación intensiva del material, dadas las dimensiones del proyecto. Por su parte, el concreto también refleja un aumento en su desperdicio, alcanzando un 7.93%, lo que equivale a un incremento de 0.65 puntos porcentuales respecto al 7.28% registrado previamente. Estas variaciones reflejan la necesidad de reforzar las estrategias de control de materiales y optimización de procesos constructivos para reducir los niveles de desperdicio.

Hasta este punto, no es posible establecer con precisión el porcentaje de residuos cerámicos, residuos de concreto y residuos contaminados generados específicamente por la construcción de la vivienda. Debido a esta incertidumbre, en el siguiente análisis se empleará la muestra representativa obtenida en campo para desglosar la composición de los 2,296 m<sup>3</sup> de residuos generados y llevados a disposición final durante la segunda etapa del proyecto. Este procedimiento permitirá realizar una caracterización más detallada de los RCD, facilitando la identificación de

categorías predominantes y proporcionando una base sólida para la implementación de estrategias de gestión y aprovechamiento adecuados.

#### 4.2.2 Piloto de medición en campo de la segunda etapa

Teniendo en cuenta lo descrito en la metodología para el desarrollo del estudio de caso, se realizó la cuantificación de los RCD teniendo en cuenta las siguientes categorías:

- a. Rc: Residuo de concreto
- b. Rb: Residuo cerámico
- c. Rb + Rc + Otros: Residuo contaminado

Una vez definidos los tipos de residuos objeto de medición en campo, se procedió a identificar los puntos de acopio en los cuales se encontraban almacenados de manera representativa. Durante un período de aproximadamente tres meses, y en concordancia con la programación de obra, se realizaron visitas quincenales al proyecto con el fin de registrar el volumen correspondiente a cada tipo de residuo generado.

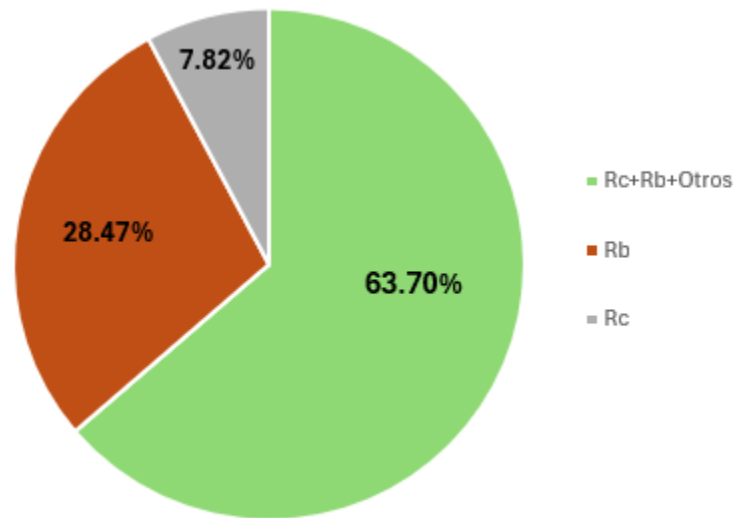
Es importante señalar que dentro del proceso de medición no se incluyó el material producto de excavaciones, debido a que la empresa constructora lo excluye expresamente del volumen total de residuos reportado como retirado y llevado a disposición final por etapa. Por tanto, con el fin de asegurar una comparación equivalente entre la información obtenida en campo y la reportada por la empresa, dicho material fue excluido de la muestra representativa. En la Tabla 14 se presentan los resultados consolidados de las mediciones en campo para cada categoría de residuo evaluada.

<b>Residuos de construcción y demolición (RCD) generados (m<sup>3</sup>)</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Contaminado (Rc+Rb+Otros)</b>	<b>Aprovechables (Rb)</b>	<b>Aprovechables (Rc)</b>	<b>Total de la visita</b>
20-jun-24	2.66	17.84	0	20.50
27-jun-24	24.73	19.65	5.60	49.98
17-jul-24	76.58	23.92	10.10	110.60
30-jul-24	75.90	13.91	7.30	97.11
15-ago-24	13.40	22.32	0	35.72
29-ago-24	25.80	5.20	5.40	36.40
12-sep-24	12.24	0.55	0	12.79
<b>Subtotal (m<sup>3</sup>)</b>	<b>231.31</b>	<b>103.39</b>	<b>28.40</b>	<b>363.10</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>63.7%</b>	<b>28.5%</b>	<b>7.8%</b>	<b>100%</b>

*Tabla 14. Muestra representativa del piloto de medición*

Un análisis sobre esta información revela que el 63.7% de estos residuos están dentro de la categoría de residuo contaminado, lo que limita su aprovechamiento en las condiciones actuales. Sin embargo, estos residuos poseen un alto potencial de reutilización, especialmente si se implementa una estrategia de separación en la fuente. La mayor parte de estos residuos contaminados están compuestos por residuos de concreto (Rc) y residuos cerámicos (Rb), materiales que pueden ser reciclados y reutilizados como agregados en futuras actividades constructivas.

Por otro lado, se identificó que el 28.5% de los residuos totales provienen directamente de la zona de corte de cerámicos, lo que evidencia una fuente significativa de generación de residuos homogéneos y no contaminados, que pueden ser fácilmente gestionados para su aprovechamiento. Finalmente, al observar la Figura 16 se detalla que los residuos de concreto (Rc) están representados por el 7.82% de la muestra total. Estos resultados resaltan la necesidad de implementar prácticas de manejo eficiente, como la separación en la fuente, para maximizar el potencial de reciclaje y minimizar el impacto ambiental del proyecto.



*Figura 16. Porcentajes de incidencia de cada categoría del RCD*

Una vez obtenida una muestra representativa de la segunda etapa del proyecto y determinada la proporción relativa de cada tipo de residuo dentro de dicha muestra, es posible utilizar esta información como base para desagregar el volumen total de residuos reportado previamente. Esta extrapolación es técnicamente válida dado que tanto la primera como la segunda etapa comparten condiciones constructivas equivalentes: emplean el mismo sistema constructivo, presentan áreas de construcción similares y mantienen prácticas de manejo de residuos prácticamente idénticas.

Asimismo, se constató que las prácticas actuales de gestión de RCD continúan siendo deficientes: no existe una separación en la fuente efectiva, todos los residuos son destinados directamente a disposición final y no se ha instaurado una cultura organizacional orientada hacia la sostenibilidad. Esta situación evidencia no solo un desconocimiento generalizado por parte del personal sobre los principios de la gestión integral de RCD, sino también sobre las obligaciones ambientales que deben cumplirse de acuerdo con la normativa vigente. Por tanto, esta caracterización no solo permite establecer parámetros técnicos para el análisis, sino que refuerza la necesidad urgente de implementar estrategias estructuradas de gestión y aprovechamiento de residuos en el proyecto.

### 4.2.3 Análisis de la generación de la segunda etapa

A partir de las mediciones en campo realizadas durante la segunda etapa del proyecto, se obtuvo una muestra representativa de 363.1 m<sup>3</sup> de residuos de construcción y demolición (RCD) generados en un período aproximado de tres meses. De esta muestra, se identificó la siguiente distribución de residuos:

- El 28.5% (103.4 m<sup>3</sup>) corresponde a residuos cerámicos (Rb) no contaminados, los cuales provienen específicamente de la zona de corte del ladrillo.
- El 7.82% (28.4 m<sup>3</sup>) corresponde a residuos de concreto (Rc), generados principalmente en actividades de fundición de estructura y preparación de grouting.
- El 63.7% (231.31 m<sup>3</sup>) corresponde a residuos contaminados (Rb + Rc + Otros), que incluyen una combinación de materiales provenientes de diversas actividades constructivas.

Con esta información, es posible realizar una extrapolación para caracterizar la totalidad de los 2,296 m<sup>3</sup> de residuos reportados en la segunda etapa, asegurando una clasificación más detallada y precisa de los RCD generados en el proyecto, como indica la Tabla 15:

<b>Vol total de la muestra m<sup>3</sup></b>	<b>Rb (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Rc (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Rc+Rb+Otros (m<sup>3</sup>)</b>
2,296	653.67	179.55	1,462.78
	28.47%	7.82%	63.71%

*Tabla 15. Caracterización del volumen de RCD generado en la segunda etapa*

A partir de esta información, se establece que de los 2,296 m<sup>3</sup> de RCD generados en la segunda etapa, 653.67 m<sup>3</sup> corresponden a residuos cerámicos (Rb), para un sistema de mampostería estructural se esperaría que este tipo de residuos fueran los predominantes, sin embargo, en este escenario se encuentran representados por el 28.47% dado que este volumen corresponde únicamente al residuo cerámico proveniente de la zona de corte, no se está teniendo en cuenta el residuo proveniente de la construcción de muros debido a que ese residuo se encuentra dentro de la categoría de contaminados.

Teniendo en cuenta la ausencia de prácticas sostenibles como la separación en la fuente, la categoría de residuos contaminados (Rc + Rb + Otros) alcanza un volumen significativamente mayor, con 1,462.78 m<sup>3</sup>. Esta situación resalta la necesidad de orientar los esfuerzos hacia la implementación de estrategias de aprovechamiento que permitan recuperar las propiedades mecánicas de estos residuos, reduciendo su disposición final y fomentando su integración en diversas aplicaciones dentro del proyecto.

Si bien no fue posible determinar de manera precisa la composición del residuo clasificado como Rc + Rb + Otros, se recurrió al análisis de los datos de incidencias hallados a partir de la información de los presupuestos de obra, los cuales ofrecen una aproximación confiable basada en el comportamiento observado durante las etapas constructivas. Según esta información, el porcentaje de representación asociado a la mampostería oscila entre el 56.9% y el 66.2%, mientras que el concreto representa entre un 29% y un 37%.

Con base en estos rangos, y reconociendo la necesidad de profundizar mediante futuros estudios que permitan establecer con mayor exactitud la composición real de este tipo de residuo contaminado, se construyó la Tabla 16. En ella se presenta una estimación teórica que agrupa los materiales predominantes utilizados en la fase estructural del proyecto, sus porcentajes de representación tanto en la primera como en la segunda etapa, y a partir de esta información, se plantea un desglose estimado del contenido del residuo contaminado (Rc + Rb + Otros).

<b>Volumen del residuo</b>	<b>1,462.78 m<sup>3</sup></b>	<b>Rc+Rb+Otros</b>
<b>Material</b>	<b>% Incidencia</b>	<b>Vol (m<sup>3</sup>)</b>
Ladrillos (Rb)	63.1%	923.44
Concreto (Rc)	31.9%	466.06
Cerámica (Rb)	0.7%	10.19
Aceros (Otros)	0.1%	1.73
Tuberías (Otros)	3.6%	52.95
Cemento (Rc)	0.4%	6.32
Tejas (Otros)	0.1%	2.10
<b>Subtotal</b>	<b>100.0%</b>	<b>1,462.78</b>

*Tabla 16. Descomposición del residuo contaminado*

Una vez descompuesto el volumen correspondiente a la categoría Rc + Rb + Otros, estimado en 1,462.78 m<sup>3</sup> de Rc+Rb+Otros, se obtuvo la siguiente distribución:

- **Residuo cerámico (Rb):** Representan un volumen de 933.63 m<sup>3</sup>, lo que equivale al 63.8% del total del residuo clasificado inicialmente como contaminado.
- **Residuo de concreto (Rc):** Corresponden al 32.3% del volumen total, es decir, 472.37 m<sup>3</sup>.
- **Otros:** Incluyen materiales como chatarra, plástico, PVC, y desechos menores. Si bien su participación es marginal, requieren una gestión diferenciada mediante alianzas con gestores especializados que garanticen su correcto tratamiento o disposición final conforme a la normativa ambiental vigente.

En la Tabla 17, se resumen los resultados anteriores:

<b>Vol de residuos</b>	<b>Rb</b>	<b>Rc</b>	<b>Otros</b>
2,296	1,583.43	651.92	60.65
	<b>68.96%</b>	<b>28.39%</b>	<b>2.64%</b>

*Tabla 17. Descomposición del volumen de residuos de la segunda etapa.*

Este análisis permite ampliar significativamente el panorama de aprovechamiento de los RCD dentro del proyecto. En el caso del residuo cerámico (Rb), su participación total pasaría del 28.47% correspondiente exclusivamente a los residuos no contaminados provenientes de la zona de corte al 68.96%, al incluir los residuos previamente clasificados como contaminados. Esta proporción robusta evidencia un alto potencial de recuperación, especialmente si se implementan estrategias efectivas de separación en la fuente que eviten su contaminación cruzada.

Por su parte, el residuo de concreto (Rc) también experimenta un aumento considerable en su participación, pasando de un 7.82% a un 28.39% bajo el escenario proyectado. Este incremento habilita la posibilidad de formular estrategias de aprovechamiento más ambiciosas, como su uso en elementos no estructurales o en procesos de relleno técnico, alineados con prácticas de construcción sostenible.

Para finalizar este análisis sobre la generación de RCD y, con base en los porcentajes de representación de cada categoría determinados a partir de las mediciones en campo, es posible extrapolar estos resultados para comprender el comportamiento de la primera etapa del proyecto. Inicialmente, la primera etapa reportó una generación total de 1,124 m<sup>3</sup> de RCD, sin embargo, en

un primer análisis no fue posible establecer su composición debido a que la información disponible provenía exclusivamente de los porcentajes de desperdicio de cada material reportados por el área de presupuestos.

Con los datos obtenidos en campo durante la segunda etapa, se cuenta ahora con una base más precisa para estimar la distribución de los RCD generados en la primera etapa, como se observa en la Tabla 18:

<b>Vol de la muestra m<sup>3</sup></b>	<b>Rb m<sup>3</sup></b>	<b>Rc m<sup>3</sup></b>	<b>Rc+Rb+Otros m<sup>3</sup></b>
1,124	320	87.9	716.1
	<b>28.47%</b>	<b>7.82%</b>	<b>63.71%</b>

*Tabla 18. Caracterización del volumen de RCD generado en la primera etapa*

De los 1,124 m<sup>3</sup> de residuos de construcción y demolición generados en la primera etapa, 320 m<sup>3</sup> corresponden a la categoría de residuo cerámico, 87.9m<sup>3</sup> corresponden a los residuos de concreto, mientras que 716.1 m<sup>3</sup> hacen parte de la categoría de residuos que se encuentran contaminados. No obstante, como se expuso previamente, es posible descomponer esta categoría utilizando la información obtenida durante el proceso de caracterización y análisis de desperdicios, tal como se evidencia en la Tabla 19:

<b>Vol de residuos</b>	<b>Rb</b>	<b>Rc</b>	<b>Otros</b>
1,124	775.16	319.15	29.69
	<b>68.96%</b>	<b>28.39%</b>	<b>2.64%</b>

*Tabla 19. Descomposición del volumen de residuos generados en la primera etapa.*

Con esta información se puede establecer un panorama para orientar los esfuerzos necesarios y lograr el máximo aprovechamiento de los RCD.

#### 4.2.4 Pesos unitarios y peso de la muestra

Teniendo en cuenta que la normativa ambiental vigente establece las metas de aprovechamiento en función del peso de los residuos, se hace imprescindible determinar la masa unitaria de cada tipo de residuo identificado en el capítulo anterior. Si bien previamente se establecieron los porcentajes de representación volumétrica de cada categoría de RCD, aún era necesario calcular

el peso correspondiente para cada uno, con el fin de cumplir con los requisitos establecidos por la Resolución 1257 de 2021 del MADS.

Para ello, se siguieron los lineamientos metodológicos previamente definidos, los cuales establecen que la masa unitaria de cada tipo de residuo debe determinarse a partir del promedio ponderado de múltiples muestras representativas. Específicamente, se tomaron tres muestras aleatorias por cada categoría de residuo, registrando su masa individual, y posteriormente se calculó el promedio de estas mediciones para obtener un valor representativo de la masa unitaria (en ton/m<sup>3</sup>) para cada tipo de RCD. En la Tabla 20 se ilustra el resumen de los resultados obtenidos:

<b>Residuo</b>	<b>Rb</b>	<b>Rc</b>	<b>Rc+Rb+Otros</b>
<b>Masa unitaria</b>	0.73 T/m <sup>3</sup>	1.01 T/m <sup>3</sup>	0.84 T/m <sup>3</sup>

*Tabla 20. Resumen de las masas unitarias*

Una vez determinadas las masas unitarias, era necesario contrarrestar la información obtenida con la literatura con el fin de determinar la variación de los resultados del estudio de caso con los resultados obtenidos por otros autores. En la Tabla 21 se realiza esta comparación:

<b>Indicador</b>	<b>Armijos<sup>a</sup> (T/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Marin<sup>b</sup> (T/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Hernández<sup>c</sup> (T/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Estudio de caso (T/m<sup>3</sup>)</b>
Residuo de concreto (Rc)	2.3	1.39	1.61	1.01
Residuo cerámico (Rb)	-	-	0.82	0.73
Residuo mezclado (Rc+Rb+Otros)	-	0.81	1.19	0.84

*Tabla 21. Masas unitarias de la literatura*

Como se evidencia, existe una relación significativa entre las masas unitarias de cada categoría de RCD obtenidos en el estudio de caso y los valores reportados en la literatura. Esta coincidencia proporciona un mayor grado de confianza en los análisis que se desarrollarán a partir de estos datos. Sin embargo, se identificaron algunas diferencias en la masa unitaria del residuo de concreto (Rc), en comparación con los valores reportados por Marín y Hernández, la masa unitaria del Rc en el estudio de caso presentó una variación entre el 27% y 35%, lo que podría estar relacionado con la granulometría de los fragmentos de residuos analizados. Es posible que, al contar con un

tamaño de partícula mayor en las muestras del estudio de caso, se generen mayores vacíos dentro del recipiente en el cual fue medido, lo que influye directamente en la reducción de la masa unitaria registrado. Por otro lado, el residuo cerámico (Rb) presentó una diferencia del 11% con Hernández, lo cual se considera mínimo y no representa una afectación significativa en la confiabilidad de los datos obtenidos.

Finalmente, en la categoría de residuos contaminados (Rc + Rb + Otros), se observa una diferencia menor en comparación con Marín, pero una variación del 29.2% con respecto a Hernández. Este comportamiento puede estar relacionado con la composición predominante de la muestra analizada en cada estudio, es probable que el residuo contaminado reportado por Hernández estuviera conformado mayoritariamente por residuos de concreto (Rc), lo que impactó directamente en su masa unitaria, dado que el concreto es más denso que el residuo cerámico (Rb). En contraste, en el estudio de caso se identificó que la mayor proporción dentro de los residuos mezclados correspondía a residuos cerámicos (Rb), los cuales tienen una masa unitaria inferior a la del concreto, lo que explica la diferencia con los valores obtenidos por Hernández.

Ahora bien, haciendo uso de los datos hallados de las masas unitarias de los RCD se procedió a realizar la transformación del volumen de la muestra representativa de la segunda etapa del proyecto, como se evidencia en la Tabla 22:

<b>Residuo</b>	<b>Volumen</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>
Rb	103.40 m <sup>3</sup>	75.0 T	25.1%
Rc	28.4 m <sup>3</sup>	28.7 T	9.6%
Rc+Rb+Otros	231.31 m <sup>3</sup>	194.9 T	65.3%
<b>Subtotal</b>	<b>363.11 m<sup>3</sup></b>	<b>298.6 T</b>	<b>100%</b>

*Tabla 22. Masa de la muestra representativa de la segunda etapa*

No obstante, como se explicó previamente, a partir de los datos de generación de volumen de RCD en la segunda etapa y la ponderación verificada con las mediciones en campo, se logró determinar el volumen de residuos correspondiente a cada categoría previamente establecida y dado que el objetivo es conocer el peso de los desperdicios de los materiales utilizados en la construcción, se empleó la información de las masas unitarias de los RCD para transformar el volumen total generado a peso total generado, como se ilustra en la Tabla 23:

<b>Residuo</b>	<b>Volumen</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>
Rb	653.67 m <sup>3</sup>	474.1 T	25.1%
Rc	179.55 m <sup>3</sup>	181.2 T	9.6%
Rc+Rb+Otros	1462.78 m <sup>3</sup>	1232.5 T	65.3%
<b>Subtotal</b>	<b>2,296 m<sup>3</sup></b>	<b>1,888 T</b>	<b>100%</b>
<b>Cant / casa</b>	<b>4.38 m<sup>3</sup></b>	<b>3.7 T</b>	

*Tabla 23. Masa de los residuos para la segunda etapa*

La información presentada en la Tabla 23 evidencia que los residuos cerámicos (Rb) y los residuos de concreto (Rc) ofrecen el potencial necesario para cumplir con la meta de aprovechamiento establecida por la Resolución 1257 de 2021 del MADS, la cual exige la reutilización de al menos el 20% del peso total de los residuos generados en proyectos de construcción ejecutados en municipios de categoría sexta (Gobernación del Cauca, 2017).

Este resultado es coherente con la tipología del proyecto, ya que el sistema constructivo basado en mampostería estructural genera una alta proporción de estos residuos, consolidándolos como los más representativos dentro del RCD generado. No obstante, se identifica una problemática crítica en la categoría de residuos contaminados (Rc + Rb + Otros), la cual representa más del 50% del peso total de residuos generados. La falta de separación en la fuente no solo dificulta el cumplimiento de las metas de aprovechamiento, sino que también incrementa la carga ambiental, ya que estos residuos, al estar compuestos por materiales con diferentes propiedades mecánicas y químicas, no pueden ser reincorporados en actividades constructivas y terminan en disposición final.

Ahora bien, anteriormente se logró descomponer de manera teórica los 1,462.78 m<sup>3</sup> de residuos contaminados y en aras de visualizar los beneficios potenciales de una adecuada gestión y separación en la fuente, se construye la Tabla 24:

<b>Residuo</b>	<b>Volumen</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>
Rb	1,583.43 m <sup>3</sup>	1,148.5 T	63%
Rc	651.92 m <sup>3</sup>	658.0 T	36.1%
Otros	60.65 m <sup>3</sup>	16.8 T	0.9%
<b>Subtotal</b>	<b>2,296.00 m<sup>3</sup></b>	<b>1,823.2 T</b>	<b>100%</b>

*Tabla 24. Escenario ideal de la segunda etapa*

Bajo este escenario, se evidencia que el aprovechamiento exclusivo del residuo cerámico permitiría alcanzar un 63% del peso total de residuos aprovechables, superando ampliamente la meta de aprovechamiento del 20% establecida por la Resolución 1257 de 2021 del MADS.

No obstante, para maximizar los beneficios económicos y ambientales del proyecto, resulta fundamental recuperar los residuos cerámicos actualmente contenidos dentro de la fracción clasificada como contaminada. Esta fracción representa un 37.9% adicional del volumen total, que podría destinarse al aprovechamiento en obra si se implementaran prácticas efectivas de separación y manejo adecuado en la fuente.

Este análisis pone de manifiesto que la instauración de una cultura sólida de gestión integral de residuos dentro del equipo de obra no solo es una necesidad normativa, sino una estrategia clave para optimizar recursos, reducir costos operativos y disminuir el impacto ambiental asociado al proyecto. Además, como se mencionó al inicio de este estudio, la disposición incontrolada de RCD es un factor que acelera la destrucción de la capa de ozono debido a la emisión de gases contaminantes durante la degradación de ciertos materiales.

#### 4.2.5 Índices de generación gravimétricos ( $IGR^W$ ) y volumétricos ( $IGR^V$ )

Una vez finalizadas las mediciones en obra, se procedió a calcular los índices volumétricos ( $IGR^V$ ) y gravimétricos ( $IGR^W$ ), herramientas esenciales para evaluar la eficiencia en la gestión de residuos durante el proceso constructivo.

Para determinar el  $IGR^V$ , se realizó la sumatoria del volumen total de RCD generados (en  $m^3$ ) durante todo el proceso constructivo. Este volumen total se relacionó con el área construida del proyecto, lo que permitió calcular la cantidad de  $m^3$  de RCD generados por cada  $m^2$  construido, proporcionando una perspectiva clara sobre el impacto volumétrico de los residuos. Esta información se presenta en la Tabla 25:

Descripción	Fase	Unidad	Etapa 1	Etapa 2
Volumen del RCD	<b>Excavación</b>	m <sup>3</sup>	2,327	6,342
Área del proyecto		m <sup>2</sup>	23,918	62,318
<b>IGR<sub>v</sub> (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>		<b>m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup></b>	<b>0.097</b>	<b>0.102</b>
Volumen del RCD	<b>Estructura</b>	m <sup>3</sup>	1,124	2,296
Área del proyecto		m <sup>2</sup>	13,499	26,223
<b>IGR<sub>v</sub> (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>		<b>m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup></b>	<b>0.083</b>	<b>0.088</b>
<b>Indicador de generación</b>		<b>m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup></b>	<b>0.181</b>	<b>0.189</b>

Tabla 25. Índice de generación volumétrico de la segunda etapa

En etapas anteriores del análisis se había determinado que la generación de RCD por área construida correspondía a aproximadamente 8 cm/m<sup>2</sup> en la primera etapa y 9 cm/m<sup>2</sup> en la segunda, considerando únicamente los residuos generados a partir del proceso de edificación. Sin embargo, al incorporar los datos presentados en la Tabla 25, se integran por primera vez los residuos provenientes de la fase de movimientos de tierra, una categoría que no había sido considerada previamente debido a la forma en que la empresa constructora clasifica y gestiona esta información de manera separada.

Esta nueva incorporación permite reformular el panorama completo de generación de RCD, abarcando de manera integral tanto los residuos generados por actividades de estructura, como aquellos derivados de excavaciones y preparación del terreno. La inclusión de estos datos no solo brinda una visión más precisa del impacto total del proyecto, sino que también facilita la definición de estrategias de aprovechamiento más ajustadas a la realidad operativa del macroproyecto.

Con esta información se calculan los índices volumétricos (IGR<sub>v</sub>) y se obtiene lo siguiente:

- Primera etapa: 0.181 m<sup>3</sup> de RCD por cada m<sup>2</sup> construido.
- Segunda etapa: 0.189 m<sup>3</sup> de RCD por cada m<sup>2</sup> construido.

Estos resultados evidencian una evaluación significativa entre ambas etapas, reflejando la congruencia en los datos. Es importante destacar que tanto la primera como la segunda etapa del proyecto comparten la misma tipología de vivienda, lo que refuerza la consistencia de los indicadores obtenidos y permite utilizarlos como referencia para futuras etapas del macroproyecto.

Con respecto a los índices gravimétricos como se detalla en la Tabla 26, los resultados obtenidos son consistentes entre ambas etapas, reflejando una correlación similar a la observada en los índices volumétricos. En resumen, los valores son los siguientes:

- Primera etapa: 253.72 Kg / m<sup>2</sup>
- Segunda etapa: 265.77 Kg / m<sup>2</sup>

Descripción	Fase	Unidad	Etapa 1	Etapa 2
Masa del RCD	Excavación	Kg	4'417,294	12'038,037
Área del proyecto		m <sup>2</sup>	23,918	62,318
<b>IGRw (Kg/m<sup>2</sup>)</b>		<b>Kg / m<sup>2</sup></b>	<b>184.68</b>	<b>193.17</b>
Masa del RCD	Estructura	Kg	903,990	1'846,585
Área del proyecto		m <sup>2</sup>	13,499	26,223
<b>IGRw (Kg/m<sup>2</sup>)</b>		<b>Kg / m<sup>2</sup></b>	<b>69.04</b>	<b>72.6</b>
<b>Indicador de generación</b>		<b>Kg / m<sup>2</sup></b>	<b>253.72</b>	<b>265.77</b>

Tabla 26. Índice gravimétrico de la segunda etapa del proyecto

Con el propósito de evaluar el comportamiento de los indicadores obtenidos en el proyecto de estudio de caso, tanto los indicadores volumétricos (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) como los gravimétricos (kg/m<sup>2</sup>), se llevó a cabo un ejercicio comparativo con los valores reportados en la literatura y la información se consolidó en la Tabla 27:

Indicador	Armijos	González	MAB	Estudio de caso
IGRv (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0.06	0.097	0.065	0.088
IGRw (kg/m <sup>2</sup> )	87.22	182	45	72.6

Tabla 27. Comparativo de indicadores de generación

Respecto al indicador volumétrico (IGRv), se evidencia una similitud entre los resultados obtenidos en el estudio de caso (0.088 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) y los reportados en la literatura. La variación más relevante corresponde a un 30% respecto al valor indicado por la Guía para la Gestión de RCD del MAB (2021), que establece un IGRv de 0.065 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> para proyectos con sistema constructivo en mampostería estructural. Esta diferencia puede atribuirse principalmente a la ausencia de prácticas de separación en la fuente en el proyecto analizado, lo cual influye directamente en la representatividad del volumen final de residuos. Mientras que la guía del MAB contempla

escenarios donde los residuos son separados por tipo, permitiendo una medición más precisa y específica del volumen útil por categoría (predominando el residuo cerámico), en el estudio de caso los residuos se acopian de manera conjunta y sin clasificación, lo que incrementa la cantidad de residuos contaminados y afecta el indicador volumétrico.

En cuanto al indicador gravimétrico (IGRw), se observa una mayor dispersión frente a los valores de referencia. El estudio de caso arrojó un valor de 72.6 kg/m<sup>2</sup>, el cual presenta una diferencia del 16.8% con respecto al valor reportado por Armijos (87.22 kg/m<sup>2</sup>), sin embargo, es importante aclarar que el estudio de Armijos se desarrolló en un contexto constructivo industrializado, por lo que la comparación directa con proyectos en mampostería estructural debe asumirse con reservas.

En comparación con el (MAB, 2021), que reporta un IGRw de 45 kg/m<sup>2</sup>, la diferencia es del 61.3%. Este contraste refuerza la importancia de implementar prácticas adecuadas de separación en la fuente. En el proyecto analizado, más del 63% del volumen total de residuos corresponde a residuos contaminados, los cuales presentan masas unitarias significativamente superiores frente a los residuos cerámicos limpios, debido a la mezcla con materiales como concreto, acero, plásticos o residuos no reciclables. Esta condición incrementa la masa total de los RCD generados, y por tanto, el valor del indicador.

Por último, el valor reportado por González (182 kg/m<sup>2</sup>) se distancia considerablemente del obtenido en el presente estudio. No obstante, al revisar la metodología de conversión de volumen a masa utilizada por la autora, se identifican inconsistencias en los factores de transformación, lo que genera dudas sobre la confiabilidad del dato reportado.

En conjunto, aunque las variaciones observadas oscilan entre el 16% y el 61%, se concluye que las condiciones particulares de la gestión, el tipo de sistema constructivo, la implementación de prácticas de separación en la fuente y la metodología de estimación, influyen de manera significativa en los resultados, por ende, los indicadores del estudio de caso deben ser entendidos como una aproximación confiable dentro del contexto operativo actual de la obra, y representan una base para proyectar estrategias de mejora en la gestión de RCD.

#### 4.2.6 Indicadores de aprovechamiento

Otro de los indicadores clave identificados para evaluar la eficiencia en la gestión de los RCD fue el indicador de aprovechamiento. Este indicador permite cuantificar, con base en la totalidad de RCD generados durante el desarrollo del proyecto, cómo se distribuyó su manejo a través de cuatro categorías fundamentales: el porcentaje de residuos dispuestos en sitios de disposición final, el porcentaje aprovechado in situ mediante su reincorporación en procesos constructivos del mismo proyecto, el porcentaje entregado a gestores autorizados para su tratamiento o reciclaje, y finalmente, el porcentaje real de aprovechamiento alcanzado frente a la meta establecida en la normativa ambiental vigente, en particular la Resolución 1257 de 2021 del MADS.

Para la primera y segunda etapa del proyecto se construyó la Tabla 28:

Indicador	Primera etapa		Segunda etapa	
	Toneladas	Indicador	Toneladas	Indicador
Cantidad de RCD generado en obra	924.2 T	100%	1,887.9 T	100%
Cantidad de RCD aprovechado en obra	0	0%	0	0%
Cantidad de RCD entregado en un punto limpio	0	0%	0	0%
Cantidad de RCD entregado en planta de aprovechamiento	0	0%	0	0%
Cantidad de RCD gestionado por receptor	0	0%	0	0%
Cantidad de RCD llevado a disposición final	924.2 T	100%	1,887.9 T	100%
<b>Meta total de aprovechamiento</b>		<b>0%</b>		<b>0%</b>

*Tabla 28. Indicador de aprovechamiento de la primera y segunda etapa*

Como se ha venido evidenciando a lo largo del análisis, en el proyecto de estudio de caso la totalidad de los residuos generados son trasladados directamente a disposición final, lo cual evidencia un incumplimiento de la meta de aprovechamiento establecida por la Resolución 1257 de 2021 del MADS. Esta situación no solo representa un riesgo normativo, al exponer al proyecto a posibles sanciones por parte de las autoridades ambientales competentes, sino que también refleja

una ausencia de estrategias estructuradas y una limitada apropiación del marco regulatorio por parte de la empresa constructora.

Ahora bien, conociendo el estado actual de la gestión de RCD, los tipos de residuos que predominan en la obra y las características particulares de cada uno de ellos, se hace posible proyectar el indicador de aprovechamiento bajo dos escenarios diferenciados. El primer escenario contempla el aprovechamiento exclusivo del residuo cerámico generado en la zona de corte de mampostería, el cual presenta condiciones favorables por su bajo nivel de contaminación y alta homogeneidad. El segundo escenario, por su parte, propone la implementación de estrategias de separación en la fuente durante el proceso constructivo, lo que permitiría ampliar el volumen de RCD susceptibles de ser reincorporados al ciclo productivo.

**a. Indicador de aprovechamiento: RCD cerámico**

En este escenario es fundamental tener presente que, para la segunda etapa del proyecto, se identificó que el residuo cerámico proveniente de la zona de corte representa un volumen de 653.67 m<sup>3</sup>, equivalente al 25.1% del total de RCD generados. Al aplicar la masa unitaria determinada para esta categoría, se obtuvo una masa de 474.1 toneladas. Si este volumen de residuos cerámicos se aprovechara directamente en el proyecto, se configuraría el escenario que se presenta en la Tabla 29:

Indicador	Segunda etapa	
	Toneladas	Indicador
Cantidad de RCD generado en obra	1,888 T	100%
Cantidad de RCD aprovechado en obra	474.1 T	25%
Cantidad de RCD entregado en un punto limpio	0	0%
Cantidad de RCD entregado en planta de aprovechamiento	0	0%
Cantidad de RCD gestionado por receptor	0	0%
Cantidad de RCD llevado a disposición final	1,414 T	75%
<b>Meta total de aprovechamiento</b>		<b>25%</b>

*Tabla 29. Indicador de aprovechamiento: primer escenario*

La sola incorporación del residuo cerámico no contaminado, generado en la zona de corte, permitiría al proyecto cumplir con la meta de aprovechamiento establecida por la Resolución 1257 de 2021 para municipios de categoría sexta, que exige un mínimo del

20% en peso de residuos aprovechados a partir del año 2029. Este resultado evidencia que el proyecto cuenta actualmente con el potencial necesario para cumplir con la normativa ambiental, sin requerir grandes transformaciones en su operación, siempre que se identifiquen e implementen adecuadamente actividades en las cuales los residuos puedan ser reincorporados en obra. Aunque una alternativa válida también sería entregar estos residuos a gestores autorizados, hacerlo implicaría perder la posibilidad de capitalizar los beneficios económicos que ofrece su aprovechamiento in situ.

**b. Indicador de aprovechamiento: Separación en la fuente**

Para este segundo escenario, se parte de la descomposición teórica del 65.3% correspondiente a la categoría de residuos contaminados (Rc+Rb+Otros), obtenida a través del análisis previo. Con base en la aplicación de prácticas efectivas de separación en la fuente, se proyecta que sería posible recuperar un 68.96% del volumen total en forma de residuos cerámicos (Rb), equivalentes a 1,583 m<sup>3</sup>; un 28.39% correspondiente a residuos de concreto (Rc), con un volumen de 651.92 m<sup>3</sup>; y un 2.64% para residuos clasificados como "otros", los cuales incluyen elementos como chatarra, plásticos y residuos menores que requieren tratamientos diferenciados.

A partir de esta información se consolida la Tabla 30, en la cual se presenta el panorama proyectado del indicador de aprovechamiento para la segunda etapa del macroproyecto:

<b>Indicador</b>	<b>Segunda etapa</b>	
	<b>Toneladas</b>	<b>Indicador</b>
Cantidad de RCD generado en obra	1887.9 T	100%
Cantidad de RCD aprovechado en obra	1148.5 T	61%
Cantidad de RCD entregado en un punto limpio	0	0%
Cantidad de RCD entregado en planta de aprovechamiento	658.0 T	35%
Cantidad de RCD gestionado por receptor	5.0 T	0%
Cantidad de RCD llevado a disposición final	76.4 T	4%
<b>Meta total de aprovechamiento</b>		<b>96%</b>

*Tabla 30. Indicador de aprovechamiento segundo escenario*

Este escenario representa una apuesta ambiciosa por la sostenibilidad en la gestión de residuos, en donde se lograría aprovechar el 100% del residuo cerámico mediante su reincorporación directa en obra a través de las estrategias de aprovechamiento. Simultáneamente, los residuos de concreto serían entregados a una planta de aprovechamiento para su procesamiento y eventual reutilización como agregados reciclados, mientras que un porcentaje de los residuos clasificados como “otros”, como la chatarra, serían gestionados por receptores autorizados.

La implementación de estas prácticas permitiría alcanzar un índice de aprovechamiento del 96%, reduciendo drásticamente la disposición final a tan solo el 4%. Este cambio no solo conlleva una mejora significativa en el desempeño ambiental del proyecto y una reducción en el impacto negativo sobre los ecosistemas y la salud humana, sino que también representa una oportunidad clara de optimización económica para la empresa constructora. En este escenario, se sientan las bases para una transición real hacia un modelo de economía circular, en el que los residuos no son vistos como desechos, sino como insumos estratégicos dentro del ciclo productivo de la obra.

En conclusión, la implementación de un Plan de Gestión Integral de RCD se vuelve fundamental, no solo como un instrumento para garantizar el cumplimiento ambiental, sino también como una herramienta técnica y operativa para aprovechar el potencial económico que representa una adecuada gestión de los residuos. Resulta particularmente relevante considerar que muchos de los RCD generados en obra presentan condiciones técnicas óptimas para ser reutilizados, sin necesidad de pasar por procesos de reciclaje complejos o costosos. La reutilización directa de estos materiales en actividades propias del proyecto permitiría no solo reducir los costos asociados a la compra de nuevos materiales, sino también disminuir los gastos relacionados con transporte y disposición final. No obstante, para que estas oportunidades puedan materializarse, es necesario fomentar una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad.

### **4.3 Plan de gestión integral de RCD**

Tras identificar que el 65.3% del total de los residuos de construcción y demolición (RCD) generados en el proyecto se clasifican como residuos combinados, se evidenció la necesidad de estructurar un plan de gestión que permitiera recuperar y aprovechar los residuos contenidos en esta categoría. El análisis teórico realizado demostró que una proporción significativa de estos residuos corresponde a residuos cerámicos, materiales que presentan un alto potencial de reincorporación en el ciclo constructivo del proyecto. Por ello, se hizo indispensable establecer lineamientos estratégicos orientados a minimizar la proporción de residuos combinados, fortalecer la separación en la fuente y maximizar las oportunidades de aprovechamiento, tanto internas como externas.

Con este propósito, se formuló el Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición para el macroproyecto objeto de estudio. La elaboración de este plan se fundamentó en la Guía para la elaboración del plan de gestión de RCD de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, adaptándolo a las características particulares del proyecto, a las capacidades técnicas y operativas de la empresa constructora, y a la normativa ambiental vigente.

El documento completo del Plan de Gestión Integral de RCD, que incluye los lineamientos, estrategias, actividades, responsables y recomendaciones para su implementación, se presenta en el Anexo 3 del presente trabajo.

## 5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Este capítulo tiene como objetivo evaluar, desde una perspectiva económica, tres escenarios distintos de manejo de RCD aplicables al macroproyecto de vivienda de interés prioritario estudio de caso. Cada escenario plantea un nivel de intervención diferente, desde la gestión convencional hasta la implementación de estrategias de aprovechamiento de residuos cerámicos generados durante el proceso constructivo.

El primer escenario corresponde a la gestión actual que realiza la empresa constructora, donde no se implementa un plan de manejo de RCD ni se realiza aprovechamiento alguno. Los residuos son transportados directamente a sitios de disposición final, generando altos costos por transporte, tarifas de disposición y pérdidas por el no aprovechamiento de materiales potencialmente reutilizables.

En el segundo escenario se considera la incorporación de una estrategia puntual de aprovechamiento del residuo cerámico (Rb) limpio generado en la zona de corte de mampostería, sin aplicar un plan de gestión integral. Este residuo, al estar libre de contaminantes, puede ser utilizado como sustituto del material granular (roca muerta) en la conformación de las terrazas de cimentación de las viviendas, lo que genera un ahorro directo en la compra de materiales, sin incurrir aún en los costos estructurales de un plan completo de gestión.

El tercer escenario contempla la posible implementación de un plan de gestión integral de RCD, incluyendo acciones como la separación en la fuente, clasificación, acopios temporales y transporte diferenciado. Gracias a esta estrategia estructurada, se logra una mayor recuperación de residuos cerámicos, que también se emplean como sustituto de roca muerta en las terrazas de cimentación, ampliando así el volumen de aprovechamiento y maximizando el ahorro de recursos.

La evaluación comparativa de estos tres escenarios permitirá determinar cuál de ellos representa la opción más viable en términos técnicos, económicos y normativos, aportando opciones para la toma de decisiones por parte de la empresa constructora.

### 5.1 Descripción de los escenarios

Con el fin de analizar la viabilidad económica de la implementación del plan de gestión integral de RCD en el macroproyecto de vivienda estudio de caso, se establecieron tres escenarios

comparativos. Cada uno de ellos representó un nivel progresivo de intervención en la gestión de RCD, lo que permitió analizar su impacto económico, normativo y operativo, así como identificar oportunidades de mejora en términos de sostenibilidad y cumplimiento regulatorio.

Previo al análisis del segundo escenario contempla el aprovechamiento de los RCD, se presenta un escenario intermedio que propone una estrategia puntual de aprovechamiento del residuo cerámico. Esta alternativa técnica, orientada a la sustitución parcial de material granular en la conformación de terrazas de cimentación, se encuentra desarrollada en mayor detalle en el Anexo 4.

### 5.1.1 Escenario 1: Gestión actual de RCD

En este escenario se detalla la gestión actual de RCD del macroproyecto. A la fecha, la empresa constructora realiza la recolección, transporte y disposición final de los RCD en sitios autorizados por la autoridad ambiental, sin implementar ningún tipo de separación en la fuente, tratamiento o reutilización de materiales. Esto representa un modelo lineal de gestión. Los siguientes, son los detalles relevantes del modelo de gestión actual:

- No se realiza clasificación ni separación de RCD en obra.
- Todo el volumen de RCD es transportado a sitios de disposición final.
- Se incurre en costos de transporte, tarifas por disposición final y gastos operativos indirectos por limpieza de RCD.
- No se utilizan los residuos con potencial técnico de aprovechamiento, como el residuo cerámico, generando un aumento innecesario en el uso de materiales vírgenes (roca muerta, arena, grava, etc.).
- No se contempla el uso de gestores de aprovechamiento de RCD, que pueden disminuir los costos comparado con la disposición final.

### 5.1.2 Propuesta de aprovechamiento: Reemplazo parcial de residuo cerámico en terrazas de cimentación de viviendas.

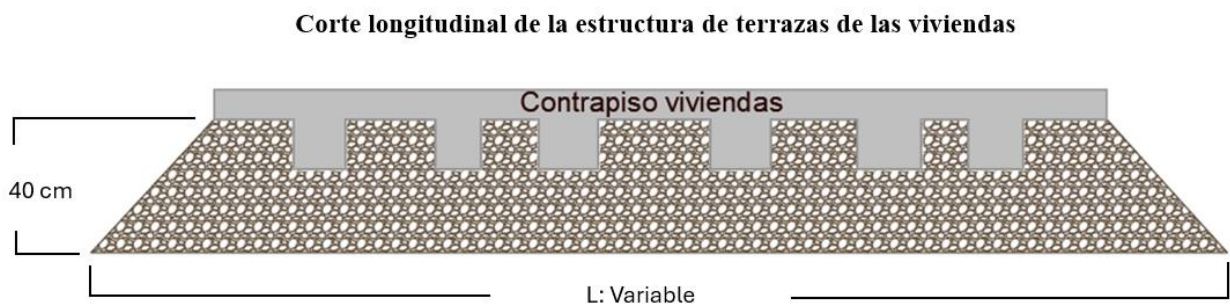
Tras el análisis detallado de las alternativas de aprovechamiento de RCD y considerando los residuos predominantes en el proyecto, se identificó que los residuos cerámicos (Rb) representan

el 25.1% del total de residuos generados en la segunda etapa del macroproyecto. Este porcentaje proviene directamente de la zona de corte de mampostería, lo que significa que se trata de material libre de contaminación, almacenado en sitios exclusivos para este tipo de residuo. En función de esta caracterización, se seleccionó la estrategia de aprovechamiento que mejor se alinea con las características del proyecto y las capacidades de la empresa constructora.

El macroproyecto se compone de agrupaciones de viviendas en pachas de 8 unidades, formando terrazas de aproximadamente 48 viviendas cada una. Según el estudio de suelos realizado por la empresa constructora, la cimentación de estas viviendas debe estar apoyada sobre una capa de mejoramiento con un espesor de 40 cm, la cual debe cumplir con parámetros granulométricos específicos para garantizar su estabilidad y capacidad de soporte. Actualmente, el material utilizado en el proyecto es la roca muerta, debido a sus propiedades mecánicas favorables, entre las que destacan:

- Ausencia de plasticidad, lo que evita problemas de expansividad.
- Buena capacidad de drenaje, minimizando el riesgo de acumulación de humedad.
- Humedad óptima de compactación del 12.86%.
- Clasificación como grava mal gradada (GP), con predominio de partículas gruesas.

Como se visualiza en la Figura 17, las vigas de cimentación (30 cm x 30 cm) se apoyan directamente sobre la capa de 40 cm de roca muerta, lo que mejora la capacidad portante del suelo y garantiza la estabilidad a la estructura.



*Figura 17. Estructura de terrazas de las viviendas*

El análisis de alternativas permitió identificar que la combinación del residuo cerámico con la subbase mejora significativamente sus propiedades mecánicas. Estudios previos realizados por

Hidalgo (2022); y Reyes (2019) han demostrado que esta combinación aumenta la capacidad portante, mejora la densidad del material y reduce su contenido de humedad. Para obtener estos resultados óptimos, se identificó que:

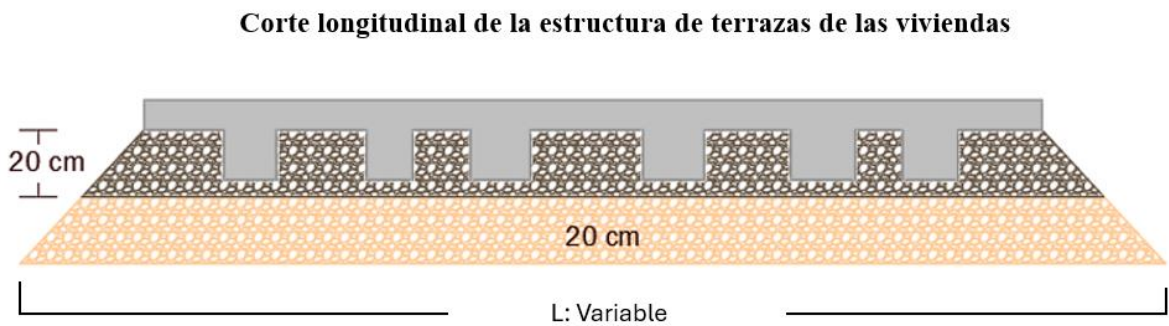
- La proporción de Rb en la mezcla debe estar entre el 20% y 30% del volumen total.
- El tamaño nominal del residuo cerámico no debe ser superior a 1", para asegurar una buena compactación y reducción de vacíos, lo que evita la saturación del material.

Si bien los estudios analizados se enfocan en la combinación de Rb con la subbase, en el caso del macroproyecto se está trabajando con roca muerta. Aunque podrían presentarse variaciones en los resultados, al analizar las propiedades granulométricas de ambos materiales se identifican características similares que permiten establecer una relación técnica entre ellos. De acuerdo con la documentación suministrada por los contratistas, la roca muerta no presenta plasticidad, posee una humedad óptima del 12.86% y un porcentaje de material que pasa por el tamiz No. 200 del 18.43%. Su distribución granulométrica es típica de una grava con contenido de finos inferior al 50%, lo que concuerda con su clasificación como grava mal gradada (GP), y la ubica como un material granular con buen comportamiento drenante. No obstante, previo a su implementación, será indispensable realizar ensayos de laboratorio específicos con la roca muerta empleada en el proyecto, con el fin de validar su viabilidad técnica y efectuar los ajustes necesarios a la estrategia de aprovechamiento.

Ahora bien, la propuesta consiste en modificar la estructura de la terraza de la siguiente manera:

- Primera capa de 20 cm: Mezcla con 20% de residuo cerámico (Rb) y 80% de roca muerta.
- Segunda capa de 20 cm: 100% roca muerta, garantizando mayor compactación en la capa superior y mejor capacidad de soporte.

Este esquema presentado en la Figura 18, sigue los principios fundamentales de estructuración de capas en ingeniería de suelos, asegurando que la capa superior tenga una mayor compactación para soportar las cargas estructurales de manera eficiente.



*Figura 18. Estructura de terrazas con la incorporación del Rb*

### 5.1.3 Escenario 2: Implementación alternativa de aprovechamiento - Uso de residuo cerámico como reemplazo parcial en la construcción de terrazas de cimentación de las viviendas.

Este escenario plantea una alternativa técnica de bajo costo que permite incorporar prácticas sostenibles sin requerir la implementación completa de un plan de gestión integral de residuos. Se basa en el aprovechamiento directo del residuo cerámico limpio generado en la zona de corte de bloques de mampostería estructural, el cual se encuentra libre de contaminación y de otro tipo de residuos y presenta propiedades mecánicas favorables para ser reincorporado como sustituto parcial del material granular tipo roca muerta utilizado en la conformación de las terrazas de cimentación de las viviendas según se especifica en las recomendaciones geotécnicas del proyecto. Este modelo no contempla una gestión integral del total de los RCD, sino un aprovechamiento puntual de un flujo específico de residuos. Bajo este enfoque, se establece lo siguiente:

- No se realizan acciones que promuevan la separación y la clasificación de RCD en la obra.
- El volumen de residuo cerámico disponible es limitado, restringido al generado por la zona de corte.
- Se logra una reducción de costos en una menor compra de material granular tipo roca muerta.
- Se alcanza una disminución de material cerámico destinado a disposición final, generando menores costos de transporte y tarifas por disposición final.

- El aprovechamiento puntual del residuo cerámico limpio permite cumplir con el mínimo del 20% de aprovechamiento establecido por la normativa según Resolución 1257 (MADS, 2021), a pesar de no implementarse una estrategia integral para todos los RCD del proyecto.

La propuesta de aprovechamiento considerada en este escenario se sustenta en estudios técnicos documentados en la literatura, particularmente en las investigaciones desarrolladas por Hidalgo (2022); y Reyes (2019), quienes evaluaron el desempeño del residuo cerámico como estabilizante de suelos en capas de cimentación, con resultados favorables tanto en términos técnicos como económicos.

A continuación, se presenta la relación de ventajas, aplicación y categoría que cada uno de los autores evidencio en sus investigaciones, esta información se sintetiza en la Tabla 31:

<b>Categoría</b>	<b>Residuo</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Reutilización	Cerámico	Incorporación del 30% RCD cerámico al suelo para construcción de vías (Hidalgo, 2022)	Incremento del CBR Menor plasticidad Mayor capacidad portante	No aplica para vías principales
Reutilización	Cerámico	Incorporación del 25%-35% de RCD cerámico a la estructura de subbase para vías (Reyes, 2019)	Aprovechamiento del RCD generado en obra	Tamaño máximo de partícula 1”

*Tabla 31. Estudios de aprovechamiento de Rb*

#### 5.1.4 Escenario 3: Implementación del plan de gestión de RCD con aprovechamiento de residuo cerámico al interior del proyecto.

Este escenario representa el mayor nivel de intervención en la gestión de residuos. Se implementa un Plan de Gestión Integral de RCD, estructurado bajo los lineamientos establecidos en las resoluciones nacionales vigentes. Este plan incluye los siguientes componentes:

- Separación en la fuente por tipos de residuos, conforme a la clasificación establecida en la Resolución 0472 del 2017. Esta contempla tres categorías: residuos pétreos (hormigón,

arenas, gravas, ladrillos y bloques, cerámicas, etc.); residuos no pétreos (vidrios, metales, PVC, cartón, yeso) y los residuos no susceptibles de aprovechamiento.

- Diseño e implementación de zonas de acopio temporales y señalización en obra.
- Capacitación del personal sobre manejo responsable y procedimientos de recolección selectiva.
- Clasificación de residuos aprovechables, en especial el cerámico, para su posterior reutilización.
- Vinculación con gestores autorizados, para los RCD que no se aprovechen al interior del proyecto.

Con la implementación del plan de gestión integral de RCD propuesto se busca lograr:

- Un mayor volumen de residuo cerámico limpio disponible para aprovechamiento, al incluir no sólo el generado en la zona de corte, sino también el obtenido mediante clasificación y separación en otras etapas del proceso constructivo.
- La sustitución de mayor volumen de roca muerta en terrazas de cimentación, realizando un menor uso de materiales naturales dentro del proyecto.
- Una disminución significativa del volumen total de RCD enviado a disposición final, reduciendo costos de transporte y tarifas de disposición final.
- El cumplimiento normativo, al superar la meta mínima de aprovechamiento exigida por la Resolución 1257 (MADS, 2021).
- El reconocimiento a la empresa constructora como una empresa alineada con los objetivos de sostenibilidad, generando un potencial beneficio en la llegada de posibles clientes que se interesen en el medio ambiente y la sostenibilidad.

## **5.2 Resultados del análisis económico**

Se realizó un análisis de costos asociados a cada escenario con el fin de conocer su potencial económico y poder presentar opciones que generen valor al interior del macroproyecto y de la empresa constructora.

Antes de calcular los costos totales asociados a cada escenario propuesto se realizó la siguiente contextualización:

- **Análisis de costos por etapa constructiva:** Los costos y cantidades proyectadas se calcularon con base en una etapa tipo de 524 unidades de vivienda, utilizando como referencia la información de la segunda etapa del macroproyecto, que fue objeto de estudio del presente trabajo y a la cual se le realizó la caracterización de la generación de RCD.
- **Análisis de precios unitarios (APU):** los análisis de precios unitarios presentados en los anexos de este documento están contruidos con base en los valores unitarios vigentes utilizados por la empresa constructora. Los rendimientos de mano de obra y maquinaria fueron verificados directamente con el equipo técnico del proyecto de estudio de caso. Para actividades específicas se solicitaron cotizaciones actualizadas a proveedores, lo que permitió estructurar de forma precisa cada uno de los APU requeridos para el desarrollo de la evaluación económica.

### 5.2.1 Costos totales del escenario 1: Gestión actual de RCD.

La gestión actual de RCD en el macroproyecto corresponden en su totalidad a disposición final. En la Tabla 31 se presentan los costos asociados para la actividad de cargue, retiro y disposición final de los RCD proyectados para la etapa tipo:

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Alquiler de maquinaria para cargue de residuos	m <sup>3</sup>	2,296	\$ 23,994	\$ 55,090,224
Retiro a externo a sitio de disposición final	m <sup>3</sup>	2,296	\$ 16,000	\$ 36,736,000
				<b>\$ 91,826,224</b>

*Tabla 31. Costos disposición final de RCD escenario 1.*

Los valores unitarios presentados fueron suministrados por la empresa constructora. El volumen total de 2,296 m<sup>3</sup> corresponde al cálculo realizado con base en los datos de la segunda etapa del macroproyecto, considerada como representativa para el resto de las etapas. De este volumen, se estimó que un 36.29% corresponde a residuos pétreos y un 63.71% a residuos no susceptibles de

aprovechamiento, según se detalló anteriormente en la Tabla 15. En este contexto, el costo neto global ascendería a \$91,826,224 en caso de mantenerse la gestión actual sin modificaciones.

### 5.2.2 Costos totales del escenario 2: Implementación de la alternativa de aprovechamiento

Como estrategia de aprovechamiento principal se propone la utilización del residuo cerámico (Rb) generado en la zona de corte del proyecto, el cual será incorporado en el proceso de conformación de las terrazas de cimentación de las viviendas, mediante una sustitución parcial del material granular tipo roca muerta. La proporción definida para la mezcla es del 80% de roca muerta y 20% de Rb, porcentaje determinado en función de los estudios técnicos disponibles y las condiciones del material recuperado.

Para la implementación de esta estrategia, se identifican las siguientes actividades operativas:

- **Transporte interno:** El residuo cerámico es trasladado desde la zona de corte hasta el sitio designado para su tratamiento dentro del macroproyecto.
- **Reducción de tamaño del residuo cerámico, mediante compactación mecánica:** Se emplea un rodillo vibrocompactador para reducir las partículas cerámicas a un tamaño máximo de 1 pulgada, condición necesaria para garantizar una adecuada mezcla y compactación junto con la roca muerta.
- **Transporte interno a sitio de instalación:** Posterior a la reducción de tamaño, el material se transporta al sitio de instalación utilizando maquinaria propia de la empresa constructora.
- **Proceso de mezcla 80% - 20%:** La integración del Rb con la roca muerta se realiza mediante un retrocargador, obteniendo una mezcla homogénea lista para ser instalada en la cimentación.

Al evaluar la posible implementación de esta alternativa de aprovechamiento, se genera una serie de ahorros directos que impactan positivamente en la rentabilidad del proyecto, entre ellos se encuentran:

- **Reducción en costos por alquiler de maquinaria para cargue:** Al disminuir el volumen de residuos cerámicos enviados a disposición final, se reduce la necesidad de alquilar maquinaria para su cargue y retiro.

- **Reducción en costos de transporte y disposición final:** El aprovechamiento in situ del Rb implica una menor cantidad de viajes hacia el sitio de disposición final, lo que se traduce en ahorros logísticos y ambientales.
- **Disminución en la compra de roca muerta:** La sustitución parcial del material granular genera una reducción proporcional en el volumen requerido de roca muerta, disminuyendo así los costos de suministro y transporte de dicho material.

Es importante tener en cuenta que, al someter el residuo cerámico a un proceso de compactación mecánica para su transformación en material granular, se produce un aumento en su densidad. La masa unitaria inicial del Rb, determinada en campo, fue de 0.73 T/m<sup>3</sup>, mientras que después del tratamiento se proyecta una masa unitaria de 1.10 T/m<sup>3</sup>, valor referenciado del estudio Hidalgo (2022), en el cual utilizó un residuo cerámico con condiciones físicas similares.

Utilizando la fórmula de la masa unitaria se obtiene la Ecuación 13:

$$Vol\ Rb\ transformado = \frac{Masa\ total}{Masa\ unitaria\ Rb\ transformado} = \frac{0.73\ T}{1.10\ T/m^3} = 0.66\ m^3 \quad (13)$$

De acuerdo con el análisis técnico realizado, se determinó que por cada 1 m<sup>3</sup> de residuo cerámico (Rb) generado en obra, se obtienen aproximadamente 0.66 m<sup>3</sup> de material transformado, este cambio de volumen se debe al proceso de compactación mecánica al que es sometido el Rb, el cual genera una redistribución del material y una mayor densidad. Esta transformación debe ser tomada en cuenta para la evaluación económica, ya que incide directamente en la cantidad efectiva de material disponible para mezcla.

Considerando esta proporción de transformación y con base en los análisis de precios unitarios desarrollados para cada una de las actividades asociadas a la estrategia de aprovechamiento ( Ver anexos 5.8, 5.9 y 5.10), se estructuraron las Tablas 32 y 33, en las cuales se presenta:

- **Tabla 32:** Costos adicionales asociados a la instalación de 1 m<sup>3</sup> de Rb generado en obra, incorporado en una mezcla 80% roca muerta y 20% Rb para terrazas de cimentación.
- **Tabla 33:** Beneficios económicos derivados del aprovechamiento del Rb en obra, principalmente por reducción en costos de compra de materiales granulares.

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Transporte interno a sitio de reducción de tamaño	m <sup>3</sup>	1	\$ 4,327	\$ 4,327
Reducción de tamaño residuo cerámico	m <sup>3</sup>	1	\$ 4,286	\$ 4,286
Transporte interno a sitio de instalación	m <sup>3</sup>	0.66	\$ 4,327	\$ 2,856
Proceso de mezcla e instalación 80% - 20%	m <sup>3</sup>	0.66	\$ 32,298	\$ 21,317
				<b>\$ 32,786</b>

*Tabla 32. APU para los costos asociados de instalar 1 m<sup>3</sup> de Rb generado en obra*

Para la elaboración de la Tabla 33, se consideró que por cada metro cúbico de residuo cerámico (Rb) generado en obra, únicamente se obtienen 0.66 m<sup>3</sup> de material transformado utilizable, debido al proceso de reducción de tamaño y compactación mecánica al que es sometido. Este proceso genera pérdidas asociadas al tratamiento del residuo, lo cual impide sustituir de forma equivalente el mismo volumen de roca muerta.

En ese sentido, el aprovechamiento de 1 m<sup>3</sup> de Rb permite reducir la necesidad de adquirir 0.66 m<sup>3</sup> de material granular tipo roca muerta.

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Suministro e instalación de roca muerta	m <sup>3</sup>	0.66	\$ 69,117	\$ 45,617
				<b>\$ 45,617</b>

*Tabla 33. APU para el ahorro asociado a la instalación de 1m<sup>3</sup> de Rb generado en obra*

Con base en los valores unitarios obtenidos, es posible proyectar el impacto económico total derivado del aprovechamiento de los 654 m<sup>3</sup> de residuo cerámico (Rb) generados en la zona de corte. Cabe resaltar que este volumen corresponde a los datos recopilados durante el análisis de la segunda etapa del proyecto, utilizada como referencia para la etapa tipo. En la Tabla 34 se

consolidan los costos totales de implementación y los ahorros esperados, permitiendo calcular el balance neto del escenario.

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Costos asociados a la incorporación del Rb	m <sup>3</sup>	654	\$ 32,876	\$ 21,490,055
Ahorros asociados por menor volumen de roca muerta	m <sup>3</sup>	654	\$ 45,617	\$ 29,818,464
<b>Diferencia</b>				<b>- \$8,328,406</b>

*Tabla 34. Costos y ahorros generados con la incorporación de la mezcla 80% roca muerta-20% Rb, escenario 2.*

Tanto el valor unitario asociado al costo de incorporación del residuo cerámico (Rb) como el ahorro por menor consumo de roca muerta ya consideran el efecto del desperdicio del material. Tal como se explicó anteriormente, por cada metro cúbico de Rb generado, solo se obtiene 0.66 m<sup>3</sup> de material transformado y utilizable en obra, debido al proceso de compactación y reducción de tamaño. Por esta razón, aunque el volumen base disponible sea de 654 m<sup>3</sup>, este no representa el total efectivo utilizado directamente en la instalación, sino que ya se encuentra ajustado en los costos y ahorros unitarios.

Con los datos obtenidos en la Tabla 34 se procede a calcular el costo neto de implementación del Escenario 2, el cual se obtiene al restar el costo total asociado a la incorporación del residuo cerámico (Rb) a los ahorros generados por la disminución en el consumo de roca muerta.

El análisis del costo neto de implementación del Escenario 2 arroja un resultado económico favorable (-\$8,328,409), evidenciado en un valor negativo, lo que indica que los ahorros generados superan los costos asociados a la estrategia. Este resultado demuestra que el aprovechamiento puntual del residuo cerámico (Rb), proveniente de la zona de corte de mampostería, no sólo cubre los requerimientos operativos para su implementación, sino que además produce un ahorro económico neto para la empresa constructora. Este balance positivo valida la viabilidad económica de la estrategia, demostrando que es posible obtener beneficios económicos relevantes incluso sin contar con un plan integral de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD).

Para calcular el costo global neto del Escenario 2, se incorpora el volumen de residuos que no fueron objeto de aprovechamiento y que, por tanto, deben ser transportados a disposición final. Mientras que en el Escenario 1 se contempla la disposición total de los residuos generados en la

segunda etapa (2,296 m<sup>3</sup>), en el Escenario 2 se logra reutilizar 654 m<sup>3</sup> de residuo cerámico (Rb) directamente en la obra. Esto se traduce en una reducción del 28.4% en el volumen total a disponer, disminuyéndolo a 1,642 m<sup>3</sup>.

A continuación, en la Tabla 35, se determina el costo asociado a la disposición final de los 1,642 m<sup>3</sup> del escenario 2. Los valores unitarios utilizados para esta estimación se encuentran detallados en el análisis de precios unitarios (APU) contenido en el Anexo 5.5

Actividad	Unidad	Cantidad	Vr Unitario	Vr Total
Alquiler de maquinaria para cargue de residuos	m <sup>3</sup>	1,642	\$ 23,994	\$ 39,406,066
Retiro a externo a sitio de disposición final	m <sup>3</sup>	1,642	\$ 16,000	\$ 26,277,280
				<b>\$ 65,683,346</b>

*Tabla 35. Costo disposición final RCD escenario 2.*

A continuación, se presenta la síntesis del análisis económico correspondiente al Escenario 2, en el cual se implementa la estrategia de aprovechamiento del residuo cerámico (Rb) limpio como sustituto parcial del material granular en la conformación de las terrazas de cimentación. Esta síntesis integra los siguientes elementos:

- **Costo asociado a la incorporación del Rb:** incluyendo actividades como el transporte interno, la reducción de tamaño del residuo, el proceso de mezcla y la instalación.
- **Ahorro generado por la disminución en el volumen requerido de roca muerta:** dado que el aprovechamiento del Rb permite reemplazar un 20% del total necesario para esta actividad constructiva.
- **Ahorro asociado a la reducción del volumen de RCD enviado a disposición final:** como resultado directo del aprovechamiento del 25.1% del volumen total de residuos generados en la segunda etapa del proyecto.
- **Costo del estudio de suelos complementario:** Con el fin de respaldar técnicamente la incorporación del Rb en la estructura del proyecto, se considera necesario incluir el costo asociado a la realización de un estudio de suelos adicional, que permita obtener el aval por parte del geotecnista responsable y asegurar la viabilidad estructural y normativa de la estrategia propuesta.

Esta consolidación permite establecer el beneficio neto del escenario y costo neto, tal como se detalla Ecuación 14 y 15:

$$\text{Costo global neto} = C1 + C2 - C3 \quad (14)$$

$$\text{Costo global neto} = -\$8,328,409 + \$65,683,346 + \$5,000,000$$

$$\text{Costo global neto escenario 2} = \mathbf{\$62,354,937}$$

Donde:

- C1: Costo neto de la implementación de la estrategia de aprovechamiento de Rb.
- C2: Costo de disposición final (Ver Tabla 35)
- C3: Costo asociado al estudio de suelos requerido.

$$\text{Beneficio global neto} = C4 - \text{CGN2} \quad (15)$$

$$\text{Beneficio global neto} = \$91,826,224 - \$62,354,937$$

$$\text{Beneficio global neto escenario 2} = \mathbf{\$29,471,287}$$

Donde:

- C4: Costo asociado a realizar 100% disposición final de los residuos.
- CGN 2: Costo global neto del escenario 2

Finalmente, el análisis económico del Escenario 2 refleja un ahorro total de \$29,471,287, resultado de la implementación de una estrategia de aprovechamiento focalizada exclusivamente en el residuo cerámico limpio proveniente de la zona de corte de mampostería. Este resultado no sólo evidencia el cumplimiento de la meta de aprovechamiento establecida por la Resolución 1257 de 2021 del MADS, sino que también confirma que es posible obtener beneficios económicos tangibles mediante acciones puntuales y técnicamente viables.

Adicionalmente, este escenario deja abierta la posibilidad de potenciar aún más los impactos positivos tanto ambientales como económicos si se amplía el alcance del aprovechamiento a otros residuos generados en obra.

### 5.2.3 Costos totales del escenario 3: Implementación del plan de gestión de RCD con aprovechamiento de residuo cerámico al interior del proyecto.

Este escenario contempla la implementación completa del plan de gestión integral de RCD, complementado con la estrategia de aprovechamiento del residuo cerámico Rb como reemplazo parcial del material granular en las terrazas de cimentación de las viviendas.

Las actividades incluidas en este escenario corresponden a acciones operativas, logísticas y organizacionales que permiten la clasificación, separación y acopio de residuos en obra, asegurando su correcto tratamiento y aprovechamiento. se establecen dos tipos de costos para la implementación del plan de gestión de RCD, costos únicos o permanentes y costos recurrentes por etapa.

#### a. Descripción de los costos únicos o permanentes.

Los costos únicos son inversiones iniciales que se ejecutan una sola vez durante la implementación del plan de gestión de RCD y que permanecen vigentes para las siguientes etapas del proyecto. Estos costos no se repiten y su efecto puede ser amortizado en el tiempo.

- **Jornada de capacitación (¿Qué es el RCD, tipos y cómo separar?):** Esta actividad busca capacitar al personal de obra en el reconocimiento de los diferentes tipos de RCD generados durante la construcción, así como en la correcta separación en la fuente y su lugar de acopio.
- **Jornada de capacitación, beneficios económicos y ambientales:** Se orienta a sensibilizar a los actores del proyecto sobre las ventajas económicas como la reducción de costos por materiales y transporte de disposición y ventajas ambientales como la disminución de uso de materiales vírgenes que se obtienen al implementar un sistema estructurado de gestión y aprovechamiento de RCD.
- **Adecuación del punto de almacenamiento de residuos:** Incluye la construcción y señalización de un espacio específico destinado a centralizar los residuos que no serán aprovechados y que requieren transporte hacia sitios de disposición final. Esta estructura se conserva a lo largo del proyecto y no requiere repetición en cada etapa.

En la Tabla 36 se presentan los costos únicos o permanentes de la implementación del plan de gestión de RCD. Los valores unitarios se calcularon por medio de APU (ver anexos 5.1, 5.2 y 5.4):

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Jornada de capacitación: que es el RCD, cuáles son los tipos, ¿cómo separar?	Und	1	\$ 990,000	\$ 990,000
Jornada de capacitación: beneficios económicos, ambientales	Und	1	\$ 315,000	\$ 315,000
Adecuación del punto de almacenamiento de residuos	m <sup>2</sup>	66	\$ 58,454	\$ 3,857,934
				<b>\$ 5,162,934</b>

*Tabla 36. Costos únicos o permanentes de la implementación del plan de gestión de RCD.*

#### **b. Descripción de los costos recurrentes por etapa**

Los costos recurrentes son aquellos que se presentan en cada etapa de construcción en la que se implemente el plan de gestión de RCD. Son necesarios para garantizar el funcionamiento operativo y logístico del sistema de separación, clasificación y aprovechamiento de residuos.

- **Supervisor de la gestión de RCD en obra:** Profesional encargado del seguimiento y control de la gestión de RCD en campo. Supervisa la correcta separación en la fuente, el cumplimiento de protocolos, el uso adecuado de zonas de acopio y la trazabilidad de los residuos. Su contratación se requiere por cada etapa constructiva.
- **Adecuación de los puntos de acopio de almacenamiento temporal:** Consiste en la habilitación de zonas dentro del área de obra para la clasificación inicial y almacenamiento ordenado de los residuos separados. Estas áreas permiten el manejo eficiente del RCD y son utilizadas durante todo el desarrollo del proyecto.
- **Transporte interno de RCD:** Esta actividad contempla el traslado de los residuos susceptibles de aprovechamiento desde el Sitio de Almacenamiento Temporal (SAR), ubicado en las zonas operativas cercanas a los frentes de obra, hacia el Sitio de Almacenamiento de Residuos Permanente (SAT). Este último corresponde al espacio designado dentro del proyecto para el acopio centralizado de los residuos, donde

permanecerán hasta su incorporación en las estrategias de aprovechamiento definidas o hasta su entrega a gestores externos.

En la Tabla 37 se pueden observar los costos recurrentes por etapa generados por la implementación del plan de gestión de RCD. Los valores unitarios se calcularon por medio de APU (ver anexos 5.3, 5.6 y 5.8):

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Supervisor de la gestión de RCD en obra frente 1	Mes	5	\$ 2,234,400	\$ 11,172,000
Supervisor de la gestión de RCD en obra frente 2	Mes	4	\$ 2,234,400	\$ 8,937,600
Adecuación de los puntos de acopio de almacenamiento temporal	m <sup>2</sup>	54	\$ 88,558	\$ 4,782,114
Transporte interno de residuos RCD	m <sup>3</sup>	1,582	\$ 4,327	\$ 6,843,931
				<b>\$ 31,735,645</b>

*Tabla 37. Costos recurrentes por etapa de la implementación del plan de gestión de RCD.*

A diferencia del Escenario 2, donde el aprovechamiento se realiza únicamente con el residuo cerámico limpio generado en la zona de corte, este escenario permite incrementar significativamente el volumen de Rb disponible, gracias a la separación y clasificación de los RCD en obra mediante la implementación del plan de gestión. Esta estrategia permite recuperar un porcentaje considerable del Rb contenido en los residuos mezclados (Rc+Rb+otros).

Según el análisis de caracterización de residuos, el total de residuos contaminados generados en la etapa correspondiente es de 1,463 m<sup>3</sup>, de los cuales 923 m<sup>3</sup> corresponden a ladrillos cerámicos (Rb) (ver Tabla 16). Con la aplicación del plan, se estima que se puede aprovechar un 80% de ese volumen, este porcentaje fue seleccionado considerando las expectativas de mejora en los procesos de separación en la fuente y clasificación, derivadas de la implementación del plan de gestión integral de RCD. Se espera que, mediante la capacitación del personal, la supervisión continua y la adecuación de zonas de acopio bien definidas sea posible aumentar este porcentaje, teniendo en cuenta los casos de éxitos de proyectos de construcción de vivienda de la región que han logrado llevar la disposición final hasta el 0%.

En la ecuación 16 se calcula el valor adicional de residuo cerámico (Rb) que se obtiene con las estrategias de separación en la fuente.

$$\text{Volumen adicional de Rb recuperado} = \text{volumen de Rb mezclado} * \% \text{recuperacion} \quad (16)$$

$$\text{Volumen adicional de Rb recuperado} = 923 \text{ m}^3 * 80\%$$

$$\text{Volumen adicional de Rb recuperado} = 738 \text{ m}^3$$

Con el volumen adicional de Rb recuperado se calcula el volumen total de Rb a aprovechar como se muestra en la Ecuación 17.

$$\text{Vol total Rb aprovechable} = \text{Vol adicional Rb recuperado} + \text{Vol Rb zona de corte} \quad (17)$$

$$\text{Vol total Rb aprovechable} = 738 \text{ m}^3 + 654 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol total Rb aprovechable} = 1,392 \text{ m}^3$$

Con este cálculo del volumen total de Rb aprovechable y con los valores unitarios de los costos y ahorros asociados a la alternativa de aprovechamiento de 80% roca muerta y 20% de Rb en las terrazas de cimentación de las viviendas, calculados en el escenario 2 en las Tablas 32 y 33, es posible proyectar el impacto económico total para los 1,392 m<sup>3</sup> de Rb aprovechable calculado en la Ecuación 17.

En la Tabla 38 se consolidan los costos totales de implementación y los ahorros esperados, permitiendo calcular el balance neto de la estrategia de aprovechamiento para este escenario.

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Costos asociados a la incorporación del Rb	m <sup>3</sup>	1,392	\$ 32,876	<b>\$ 45,777,200</b>
Ahorros asociados por menor volumen de roca muerta	m <sup>3</sup>	1,392	\$ 45,617	<b>\$ 63,518,023</b>

*Tabla 38. Costos y ahorros generados con la incorporación de la mezcla 80% roca muerta 20% Rb, escenario 3.*

Con los datos obtenidos en la Tabla 38 se procede a calcular el costo neto de implementación del Escenario 3, el cual se obtiene al restar el costo total asociado a la estrategia de aprovechamiento a los ahorros generados por la disminución en el consumo de roca muerta.

El análisis del costo neto de implementación del Escenario 2 arroja un resultado económico favorable (-\$17,740,823), el resultado negativo del costo neto de implementación del Escenario 3 evidencia que los ahorros generados son mayores que los costos de implementación que la estrategia de aprovechamiento del residuo cerámico (Rb). Este balance positivo valida la viabilidad económica de la estrategia, demostrando que es posible obtener beneficios económicos relevantes mayores si se cuenta con un plan integral de RCD estratégicamente adaptado a las condiciones del proyecto y de la empresa constructora.

Para calcular el costo global neto del Escenario 3, se incorpora el volumen de residuos que no fueron objeto de aprovechamiento dentro del proyecto y que, por tanto, deben ser transportados a disposición final o a sitios gestores de aprovechamiento. En la caracterización de RCD de la segunda etapa del proyecto se obtuvieron 180 m<sup>3</sup> de residuos de concreto (Rc) que serán transportados a sitios de gestores de aprovechamiento y 1,463 m<sup>3</sup> de residuos mezclado (Rc+Rb+otros) (ver Tabla 15). En el caso del residuo mezclado se considera obtener un 80% de material separado y limpio, para ser aprovechado tanto en el proyecto como por gestores y el 20% de material que será llevado a disposición final.

En la Tabla 39 se muestra la cantidad de residuo mezclado (Rc+Rb+otros) enviado a disposición final y a gestores de aprovechamiento.

<b>Tipo de RCD</b>	<b>Rc+Rb+Otros Vol (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Disposición final 20% Vol (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Gestores de aprovechamiento 80% Vol (m<sup>3</sup>)</b>
Ladrillos (Rb)	923.44	184.688	738.75*
Concreto (Rc)	466.06	93.212	372.85
Cerámica (Rb)	10.19	2.038	8.15
Aceros (Otros)	1.73	0.346	1.38
Tuberías (Otros)	52.95	10.59	42.36
Cemento (Rc)	6.32	1.264	5.06
Tejas (Otros)	2.1	0.42	1.68
<b>Subtotal</b>	<b>1,463</b>	<b>293</b>	<b>431</b>

*Tabla 39. Cantidad de RCD enviado a disposición final y gestores de aprovechamiento proveniente de residuo mezclado.*

A partir de la información presentada en la Tabla 39, es importante destacar que el 80% del volumen correspondiente a residuos de ladrillo (Rb) no se considera disponible para ser enviado a gestores externos de aprovechamiento, ya que este se reutiliza directamente al interior del proyecto

como parte de la estrategia de valorización in situ. Como resultado, el volumen de residuos destinados a disposición final es de 293 m<sup>3</sup>, mientras que los residuos enviados a gestores de aprovechamiento externos ascienden a 431 m<sup>3</sup>.

Adicionalmente, se contemplan 180 m<sup>3</sup> de residuos de concreto (Rc) que también son susceptibles de ser aprovechados externamente (ver Tabla 15), lo cual eleva el volumen total enviado a gestores de aprovechamiento a 611 m<sup>3</sup>.

A continuación, en la Tabla 40, se determina el costo asociado a la disposición final de 293 m<sup>3</sup>.

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Alquiler de maquinaria para cargue de residuos	m <sup>3</sup>	293	\$ 23,994	\$ 7,019,685
Retiro a externo a sitio de disposición final	m <sup>3</sup>	293	\$ 16,000	\$ 4,680,960
				<b>\$ 11,700,645</b>

*Tabla 40. Costo de RCD enviado a disposición final escenario 3*

En la Tabla 41 se presentan los costos asociados al envío de 611 m<sup>3</sup> de residuos a gestores de aprovechamiento, correspondientes al Escenario 3. Es importante destacar que, en el caso del residuo de concreto (Rc), el valor calculado refleja una reducción con respecto al costo habitualmente asumido para la disposición final, ya que en este escenario únicamente se incurre en los costos de transporte hasta la planta de aprovechamiento, sin incluir tarifas por disposición.

<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Vr Unitario</b>	<b>Vr Total</b>
Alquiler de maquinaria para cargue de residuos	m <sup>3</sup>	611	\$ 23,994	\$ 14,661,054
Retiro de Rc para entregar a los gestores.	m <sup>3</sup>	552	\$ 6,000	\$ 3,314,400
Retiro de (otros) para entregar a gestores.	m <sup>3</sup>	58	\$ 16,000	\$ 938,080
				<b>\$ 18,913,534</b>

*Tabla 41. Costo de RCD enviado a gestores de aprovechamiento escenario 3.*

A continuación, se presenta la síntesis del análisis económico correspondiente al Escenario 3, en el cual se implementa el plan de gestión de RCD en conjunto con la estrategia de aprovechamiento

del residuo cerámico (Rb) como sustituto parcial del material granular en la conformación de las terrazas de cimentación. Esta síntesis integra los siguientes elementos:

- **Costos únicos o permanentes del plan de gestión de RCD:** Se refiere a los gastos asociados a la ejecución inicial del plan, particularmente a las capacitaciones dirigidas al personal técnico y operativo del proyecto.
- **Costos recurrentes por etapa del plan de gestión de RCD:** Corresponde a los costos operativos que se presentan en cada etapa del proyecto e incluyen la contratación de personal encargado de verificar el cumplimiento de los lineamientos del plan, garantizar la correcta separación en la fuente, supervisar los puntos de acopio, y coordinar las actividades logísticas de transporte interno de los residuos desde las zonas de generación hasta los sitios de almacenamiento temporal establecidos dentro del proyecto.
- **Costo neto de la implementación de la estrategia de aprovechamiento del Rb:** Incluye las actividades necesarias para transformar y utilizar el residuo cerámico como reemplazo parcial del material granular tipo roca muerta.
- **Costo de envío de RCD a disposición final:** Considera el volumen de residuos que, por sus características físicas, químicas o por contaminación, no son susceptibles de aprovechamiento. Estos residuos deben ser transportados y dispuestos en sitios autorizados por la autoridad ambiental competente.
- **Costo de envío de RCD a gestores de aprovechamiento:** Incluye los residuos que, aunque no pueden ser aprovechados directamente en el proyecto, sí cuentan con potencial de valorización a través de gestores externos especializados. Este costo contempla el transporte y entrega de los residuos a dichos gestores para su procesamiento, transformación o reutilización en otras actividades productivas.
- **Costo del estudio de suelos complementario:** Con el fin de respaldar técnicamente la incorporación del Rb en la estructura del proyecto, se considera necesario incluir el costo asociado a la realización de un estudio de suelos adicional, que permita obtener el aval por parte del geotecnista responsable y asegurar la viabilidad estructural y normativa de la estrategia propuesta.

Esta consolidación permite establecer el costo neto del escenario, tal como se detalla Ecuación 18:

$$\text{Costo global neto} = C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6 \quad (18)$$

*Costo global neto =*

$$\$5,162,934 + \$ 31,735,645 - \$ 17,740,823 + \$11,700,645 + 18,913,534 + 5,000,000$$

$$\text{Costo global neto escenario 3} = \mathbf{\$54,771,935}$$

Donde:

- C1: Costos únicos o permanentes del plan de gestión de RCD.
- C2: Costos recurrentes por etapa del plan de gestión de RCD.
- C3: Costo neto de la implementación de la estrategia de aprovechamiento de Rb.
- C4: Costo envío de RCD a disposición final.
- C5: Costo envío de RCD a gestores de aprovechamiento.
- C6: Costo asociado al estudio de suelos requerido.

Para conocer el beneficio asociado a este tercer escenario, se hace uso de la Ecuación 19:

$$\text{Beneficio global neto} = C7 - \text{CGN 3} \quad (19)$$

$$\text{Beneficio global neto} = \$91,826,224 - \$54,771,935$$

$$\text{Beneficio global neto} = \mathbf{\$37,054,289}$$

Donde:

- C7: Costo asociado a llevar a disposición final el 100% de los residuos.
- CGN 3: Costo global neto del escenario 3

La evaluación económica del Escenario 3 refleja un beneficio neto de \$37,054,289, producto de la implementación del plan de gestión integral de RCD junto con la estrategia de aprovechamiento del residuo cerámico (Rb). Este resultado representa un incremento del 25.7% en los beneficios económicos en comparación con el Escenario 2, en el cual únicamente se aprovechaba el residuo limpio proveniente de la zona de corte. Este aumento significativo en los beneficios evidencia que la incorporación de un plan estructurado de gestión, que contempla tanto el aprovechamiento in situ de residuos como su entrega a gestores especializados, maximiza el retorno económico del proyecto. Adicionalmente, la reducción del volumen de RCD enviado a disposición final no sólo

disminuye los costos operativos asociados a transporte y tarifas, sino que mitiga los impactos ambientales negativos derivados de prácticas tradicionales de disposición.

### **5.3 Comparación de los escenarios**

Una vez culminado el análisis de costos individuales de los tres escenarios evaluados, se procedió a desarrollar una evaluación económica comparativa, cuyo objetivo fue identificar el beneficio económico neto derivado de las estrategias de gestión y aprovechamiento de residuos planteadas. Para ello, se tomó como punto de referencia el Escenario 1, correspondiente al modelo tradicional de disposición final del 100% de los residuos generados en el proyecto. El beneficio económico neto de los Escenarios 2 y 3 se obtuvo calculando la diferencia entre el costo global neto del Escenario 1 y el costo global neto de cada uno de los escenarios alternativos.

Además, se evaluó también el desempeño de cada escenario en términos de gestión de residuos y cumplimiento de la meta de aprovechamiento establecida en la Resolución 1257 de 2021 del MADS, tal como se detalla en la Tabla 42:

<b>Concepto</b>	<b>Escenario 1: Disposición Final</b>	<b>Escenario 2: Aprovechamiento Rb Limpio</b>	<b>Escenario 3: Plan de Gestión + Aprovechamiento Rb</b>
Volumen total de RCD generado (m <sup>3</sup> )	2,296	2,296	2,296
Volumen de RCD aprovechado en el proyecto (m <sup>3</sup> )	0	654	1,392
Volumen de RCD enviado a disposición final (m <sup>3</sup> )	2,296	1,642	293
Volumen de RCD enviado a gestores (m <sup>3</sup> )	0	0	611
Porcentaje de aprovechamiento (%)	0.0%	28.5%	87.3%
Costo global neto del escenario (COP)	\$ 91,826,224	\$ 62,354,937	\$ 54,771,935
Beneficio global neto del escenario	\$ 0	\$ 29,471,287	\$ 37,054,289
Cumple con normativa (Res 1257)	No	Si	Si
Aprovechamiento interno	No	Si	Si
Ahorro generado en función del Esc. 1	-	<b>32%</b>	<b>40%</b>

*Tabla 42. Comparación económica de los escenarios*

En los escenarios 2 y 3 se consideró un margen del 20% de desperdicio sobre los RCD susceptibles de aprovechamiento, como medida de prudencia frente a los análisis económicos presentados. No obstante, es importante destacar que existen experiencias documentadas de proyectos desarrollados por otras empresas constructoras de la región que han logrado reducir en un 100% la disposición final de sus RCD, lo que evidencia el potencial de mejora continua en la gestión de residuos.

Ahora bien, estos escenarios reflejan con claridad que el aprovechamiento de los RCD no sólo representa un compromiso ambiental, sino también una oportunidad real de optimización económica frente al modelo tradicional de disposición final. Si bien el aprovechamiento del residuo limpio proveniente de la zona de corte (Escenario 2) genera un ahorro significativo del

32% sin necesidad de implementar un plan integral, los resultados demuestran que la combinación de una gestión estructurada con estrategias de aprovechamiento (Escenario 3) potencia los beneficios a un 40%, garantizando el cumplimiento normativo, la sostenibilidad ambiental y un impacto económico favorable y sostenido a lo largo del tiempo.

## 6 CONCLUSIONES

Después de analizar el estado actual del proyecto de estudio de caso, identificar las oportunidades de mejora y definir las estrategias de aprovechamiento más adecuadas según las necesidades del proyecto y las capacidades técnicas y operativas de la empresa constructora, se presentan a continuación las conclusiones derivadas del trabajo de grado, así como una serie de recomendaciones orientadas a futuras investigaciones o implementaciones que busquen profundizar y replicar los resultados obtenidos.

### 6.1 Conclusiones

- A partir del análisis de los resultados de la primera etapa del proyecto de estudio de caso y del piloto de medición en campo, se identificaron oportunidades para optimizar la gestión de los RCD, si bien aún es necesario que la empresa constructora implemente estrategias para dar cumplimiento con las metas de aprovechamiento establecidas en la Resolución 1257 del 2021, el ejercicio evidenció la voluntad por avanzar hacia prácticas más sostenibles. Esta disposición al cambio refleja un compromiso creciente por parte de la organización en transformar su cultura operativa, tanto a nivel corporativo como en sus frentes de obra. La apertura demostrada no sólo sienta las bases para una mejora continua en la gestión de residuos, sino que proyecta un camino sólido hacia la implementación de los lineamientos planteados en el plan de gestión integral, con miras a futuros proyectos más conscientes, responsables y ambientalmente sostenibles.
- A través del piloto de medición se logró comprender con mayor precisión la dinámica de generación y gestión de los RCD en el proyecto. Este ejercicio de campo facilitó la identificación de los residuos predominantes derivados de la fase constructiva, evidenciando su potencial de aprovechamiento. A diferencia de la información obtenida exclusivamente a partir del presupuesto, el piloto brindó datos precisos que sirvieron para construir una línea base sólida, esencial para orientar las estrategias de mejora y gracias a ello, se identificaron oportunidades concretas para optimizar la gestión de los RCD, alineando estos esfuerzos con los intereses de sostenibilidad de la empresa constructora. El proyecto, además, presenta condiciones operativas favorables que pueden facilitar la

implementación de prácticas sostenibles, lo que representa una ventaja estratégica para alcanzar beneficios ambientales y económicos en el corto y mediano plazo.

- El análisis realizado demuestra que la propuesta de un Plan de Gestión Integral de RCD es viable desde el punto de vista técnico, al estar fundamentada en estudios previos y experiencias similares documentadas que respaldan el uso del residuo cerámico (Rb) como sustituto parcial en procesos constructivos. La alternativa de aprovechamiento planteada se alinea con las capacidades operativas de la empresa y con los lineamientos normativos vigentes. No obstante, para su implementación efectiva será indispensable realizar ensayos de laboratorio que verifiquen las propiedades del material en condiciones locales, así como ejecutar un plan piloto controlado que permita evaluar el comportamiento del residuo en obra, validar su desempeño y ajustar los procedimientos constructivos en función de los resultados. Esto garantizará una implementación segura, eficiente y replicable en futuras etapas del proyecto.
- La implementación de un Plan de Gestión Integral de RCD en el macroproyecto no sólo representa una herramienta clave para cumplir con la normativa ambiental vigente, sino que también como una estrategia de alto valor para la sostenibilidad y eficiencia económica del proyecto. Este tipo de planes permite estructurar procesos de separación, reutilización y aprovechamiento de residuos que reducen el uso de sitios de disposición final y la demanda de materiales naturales. Además, el estudio evidenció que una gestión adecuada de los residuos puede traducirse en ahorros económicos significativos, al disminuir los costos asociados a transporte y adquisición de materiales inicialmente presupuestados. En consecuencia, el plan se justifica tanto por el cumplimiento de la normatividad sobre RCD, así como por ser una oportunidad para optimizar recursos, mejorar la rentabilidad del proyecto y fortalecer el compromiso ambiental de la empresa.
- La evaluación económica realizada permitió comparar tres escenarios de gestión de RCD, evidenciando que la implementación completa del Plan de Gestión Integral de RCD con estrategias de aprovechamiento interno (escenario 3) es la alternativa más favorable desde el punto de vista económico. Este escenario presenta los menores costos operativos totales, al reducir significativamente los gastos en transporte, disposición final y adquisición de materiales naturales. Adicionalmente, se identificó que los beneficios económicos pueden aumentar progresivamente en la medida en que se integren nuevas estrategias de

aprovechamiento y se fortalezcan los procesos de separación y reutilización de residuos. Este enfoque no sólo es viable para el proyecto actual, sino que también puede ser replicado en las siguientes etapas constructivas y en futuros desarrollos inmobiliarios de la empresa, consolidando una visión sostenible y rentable a largo plazo.

- El sector constructor es un pilar fundamental para el desarrollo social y económico del país, pero también es uno de los principales responsables del impacto ambiental generado en nuestras ciudades. Esta realidad impone una responsabilidad ineludible, la cual es construir de manera consciente, sostenible y comprometida con el cuidado del medio ambiente. Hoy existen lineamientos claros, como la gestión adecuada de los RCD, que buscan minimizar dicho impacto y este proyecto de grado evidenció que una gestión responsable no representa una carga económica adicional; por el contrario, abre la puerta a nuevas oportunidades, optimiza costos y genera beneficios tanto para la empresa como para la ciudad y las generaciones futuras, ya que, cada metro cúbico de residuos que se lleva a disposición final sin ser aprovechados, no solo profundiza el daño ambiental, sino que representa una pérdida tangible de recursos económicos y una falta de compromiso con el medio ambiente. El cambio hacia una construcción más limpia, sostenible y consciente no depende únicamente de la normativa vigente; depende, sobre todo, de la decisión de cada empresa del sector de asumir su papel como agente de transformación.

## **6.2 Sugerencias para trabajos futuros**

- Se recomienda explorar la incorporación de herramientas tecnológicas como códigos QR, sensores IoT o plataformas integradas en BIM para establecer un sistema de trazabilidad de los residuos desde su generación hasta su disposición o aprovechamiento final. Esta trazabilidad permitiría monitorear en tiempo real el cumplimiento de los lineamientos del plan de gestión, generar reportes automáticos para autoridades ambientales y facilitar la toma de decisiones basada en datos, aumentando la transparencia y el control sobre la gestión de los RCD.
- Una línea de investigación futura clave es la evaluación del impacto ambiental global mediante un estudio de ciclo de vida (ACV). Comparar el modelo tradicional de

disposición con los escenarios de aprovechamiento propuestos permitiría cuantificar indicadores como huella de carbono, consumo de recursos no renovables y emisiones de gases efecto invernadero, lo cual fortalece la argumentación ambiental del plan y justifica su implementación más allá del factor económico.

- Dado que los índices de generación y el potencial de aprovechamiento de RCD varían según el sistema constructivo utilizado, se sugiere replicar este análisis en proyectos con tipologías distintas, como construcción industrializada, estructuras metálicas o sistemas mixtos. Este tipo de comparación permitiría establecer patrones, ajustar indicadores por sistema y construir una base técnica más robusta.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2002). *Decreto 1713 de 2002*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2023). *Decreto 507 de 2023 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.*  
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=150476>
- Aldana, J., & Serpell, A. (2012). *Topics and tendencies of construction and demolition waste: a meta-analysis*. <https://www.scielo.cl/pdf/rconst/v11n2/art02.pdf>
- AMEC. (2024). *Alertas y tendencias exclusivas*. <https://www.amec.es/anticipate/alertas-y-oportunidades/2025-sera-un-ano-clave-para-el-real-decreto-de-envases/>
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2010). *Ley para la gestión integral de residuos*.
- Barbosa, D. (2023). *Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición, obra 826 Central, en la empresa Jaramillo Mora Constructora*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/55725/dcbarbosas.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Camacol. (2022). *Proyección sectorial: PIB edificador 2023*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/[https://camacol.co/sites/default/files/descargables/Informe%20Econ%C3%B3mico%20115\\_0.pdf](https://camacol.co/sites/default/files/descargables/Informe%20Econ%C3%B3mico%20115_0.pdf)
- COFEMA. (1992). *Normas para la generación, manipulación, transporte y tratamiento de residuos peligrosos*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/<https://faolex.fao.org/docs/pdf/arg23093.pdf>
- Consortio GIRSU. (2022). *Informe de operaciones de residuos*. <https://consorciogirsu.com.ar/wp-content/uploads/2023/09/Informe-web-2022.pdf>
- Corporación de fomento de la producción. (2020). *Hoja de ruta RCD*.  
<https://construye2025.cl/rcd/hoja-de-ruta/>
- CVC. (2018). *En Cali se producen casi un millón de metros cúbicos al año*.  
[https://cvc.gov.co/estudio\\_escombros](https://cvc.gov.co/estudio_escombros)

- Devia, J. (2021). *Análisis de las alternativas de aprovechamiento de agregados reciclados derivados de RCD en obra*. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Fernández, G. (2020). *El problema de la gestión de los residuos sólidos en Costa Rica*. <https://www.360-sv.com/blog/residuos#:~:text=El%20principal%20componente%20de%20los%20residuos%20s%C3%B3lidos,todos%20nuestros%20residuos%2C%20o%202068%20toneladas%20diarias.&text=Mientras%20que%20un%2014%2C14%%20de%20los%20residuos,a%20ninguna%20de%20las%20categor%C3%ADas%20anteriores%209.>
- Formoso, C., Isatto, E., & Hitomi, E. (1999). *Method for waste control in the building industry*. [https://www.researchgate.net/publication/228646326\\_Method\\_for\\_Waste\\_Control\\_in\\_the\\_Building\\_Industry](https://www.researchgate.net/publication/228646326_Method_for_Waste_Control_in_the_Building_Industry)
- Fundación Hanns Seidel. (2020). *Gestión de residuos de la construcción y demolición*. [https://nuevasgeneraciones.com.ar/sitio/wp-content/uploads/documentos3/\\_archivo/2020/NG-PP320-Gestion-residuos-demolicion-AGO2020.pdf?PP320](https://nuevasgeneraciones.com.ar/sitio/wp-content/uploads/documentos3/_archivo/2020/NG-PP320-Gestion-residuos-demolicion-AGO2020.pdf?PP320)
- Gobernación del Cauca. (2017). *Acuerdo 10 del 2017*. [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.puertotejada.gov.co%2Floader.php%3FIServicio%3DTools2%26ITipo%3Ddescargas%26IFuncion%3Ddescargar%26idFile%3D16284&psig=AOvVaw1eFWTpISzXyjKCP-vh0Er\\_&ust=1742677907020000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAQQn5wMahcKEwjokYWwi5yMAxUAAAAAHQAAAAAQBA](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.puertotejada.gov.co%2Floader.php%3FIServicio%3DTools2%26ITipo%3Ddescargas%26IFuncion%3Ddescargar%26idFile%3D16284&psig=AOvVaw1eFWTpISzXyjKCP-vh0Er_&ust=1742677907020000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAQQn5wMahcKEwjokYWwi5yMAxUAAAAAHQAAAAAQBA)
- Hidalgo, C. (2022). *Evaluación del desempeño de mezclas de suelo y residuos de la construcción como una alternativa para el mejoramiento de subrasantes de vías de bajo volumen de tránsito*. [https://www.researchgate.net/publication/369030378\\_Evaluacion\\_del\\_desempeno\\_de\\_mezclas\\_de\\_suelo\\_y\\_residuos\\_de\\_la\\_construccion\\_como\\_una\\_alternativa\\_para\\_el\\_mejoramiento\\_de\\_subrasantes\\_de\\_vias\\_de\\_bajo\\_volumen\\_de\\_transito](https://www.researchgate.net/publication/369030378_Evaluacion_del_desempeno_de_mezclas_de_suelo_y_residuos_de_la_construccion_como_una_alternativa_para_el_mejoramiento_de_subrasantes_de_vias_de_bajo_volumen_de_transito)
- Instituto de la Construcción de Chile. (2023). *Los Residuos de Construcción y Demolición en Chile: un reto camino a la construcción sostenible*.

<https://www.iconstruccion.cl/2023/10/03/los-residuos-de-construccion-y-demolicion-en-chile-un-reto-camino-a-la-construccion-sostenible/>

Inter Press Service. (2023). *Reciclaje en Cuba pendiente de mayores aportes económicos y sociales*. [https://ipsnoticias.net/2023/10/reciclaje-en-cuba-pendiente-de-mayores-aportes-economicos-y-sociales/#google\\_vignette](https://ipsnoticias.net/2023/10/reciclaje-en-cuba-pendiente-de-mayores-aportes-economicos-y-sociales/#google_vignette)

Llatas, C. (2011). *A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11000559?via%3Dihub>

Lu, W. (2021). *Estimating construction waste generation in the Greater Bay Area, China using machine learning*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X21004372>

Ministerio de ambiente de Bogotá (MAB). (2021). *Guía para la elaboración del plan de gestión de residuos de construcción y demolición - RCD en obra*. <https://www.ambientebogota.gov.co/guia-para-la-elaboracion-del-plan-de-gestion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion-rcd-en-obra>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS). (2017). *Resolución 0472 del 2017*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0472-de-2017/>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS). (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS). (2021). *Resolución 1257 de 2021*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1257-de-2021.pdf>

Marín, O. (2024). *¿Cómo se recicla en Cuba?* <https://periodismodebarrio.org/2024/05/como-se-recicla-en-cuba/>

Martínez, N. (2021). *Aprovechamiento de residuos cerámicos de construcción en concretos no estructurales fabricados en obra: estudio de caso*. Pontificia Universidad Javeriana Cali.

- Mercante, I. (2007). *Caracterización de residuos de la construcción. Aplicación de los índices de generación a la gestión ambiental*.  
[https://dspace.uces.edu.ar/jspui/bitstream/123456789/152/1/Caracterizaci%  
c3%  
b3n\\_de\\_residuos.pdf](https://dspace.uces.edu.ar/jspui/bitstream/123456789/152/1/Caracterizaci%c3%b3n_de_residuos.pdf)
- Ministerio de ambiente. (2020). *Mesa Nacional de Promoción de la Economía Circular*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/residuos.pdf>
- Ministerio de ambiente. (2021). *Colombia está comprometida con la acción climática global*.  
<https://www.minambiente.gov.co/colombia-esta-comprometida-con-la-accion-climatica-global-ministro-de-ambiente/>
- Ministerio del medio ambiente (MMA). (2020). *Entornos construidos circulares*.  
<https://economiecircular.mma.gob.cl/construccion/>
- Observatorio Ambiental. (2023). *Residuos de Construcción y Demolición aprovechados en el Distrito Capital*. <https://oab.ambientebogota.gov.co/residuos-de-construccion-y-demolicion-aprovechados-en-el-distrito-capital/>
- Parlamento Europeo. (2024). *El trabajo de la UE para la gestión sostenible de residuos*.  
<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180328STO00751/el-trabajo-de-la-ue-para-la-gestion-sostenible-de-residuos>
- Peña, S. (2018). *Evaluación de las propiedades de residuos de construcción y demolición de concreto para su uso en la elaboración de sub-bases granulares. Una alternativa al manejo de residuos en el Valle de Aburrá*. [https://www.colmayor.edu.co/wp-content/uploads/2021/08/7.-Evaluaci%  
C3%  
B3n-de-propiedades-de-RCD-sub-bases.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.colmayor.edu.co/wp-content/uploads/2021/08/7.-Evaluaci%<br/>C3%<br/>B3n-de-propiedades-de-RCD-sub-bases.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- Quispe, J. (2020). *Estabilización de subrasante mediante uso de RCD*.  
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7291/T010\\_47535662\\_T.pdf?sequence=4&utm\\_source=chatgpt.com](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7291/T010_47535662_T.pdf?sequence=4&utm_source=chatgpt.com)
- Reyes, D. (2019). *Efectos de la reutilización de residuos de cerámica roja en la subbase de pavimento flexible, Lima*. Universidad César Vallejo.

- Rivas, L. (2015). *Situación ambiental de la playa La Puntilla, Santa Fe, La Habana, Cuba*.  
<https://aquadocs.org/items/d774e790-b5ed-489e-b6b8-13d2c78d2228>
- Sánchez, K., & Valencia, A. (2021). *Diagnóstico de la situación ambiental a partir de los informes de las organizaciones responsables de la celda de contingencia El Cortijo en Puerto Tejada*.  
Universidad del Valle.
- Secretaría de ambiente de Bogotá (SDA). (2015). *Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición - RCD en obra*.  
<https://www.ambientebogota.gov.co/guia-para-la-elaboracion-del-plan-de-gestion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion-rcd-en-obra>
- Sharkawi, A. (2016). *Performance of Green Aggregate Produced by Recycling Demolition Construction Wastes (Case Study of Tanta City)*.  
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=63635>
- Soutsos, M. (2011). *Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810003818?via%3Dihub>
- Superintendencia de Servicios Públicos. (2024). *Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2023*.  
[chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2023.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2023.pdf)
- UICN. (2022). *Guía de manejo de escombros y otros residuos*.  
<https://es.slideshare.net/slideshow/guia-de-manejo-escombros-y-residuos-en-la-construccionpdf/253757624>
- Wolff, G. (2017). *Protocolo de la UE para la gestión de residuos de construcción y demolición*.  
Comisión Europea DG Medio Ambiente.
- Yost, P. (1996). *A methodology for quantifying the volume of construction waste*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734242X96900440?via%3Dihub>

## 8 ANEXOS

### MEDICIONES EN CAMPO

A continuación, se presentan las mediciones realizadas en campo desde el 20 de junio del 2024 hasta el 12 de septiembre del 2024, estas mediciones fueron realizadas con el objetivo de determinar la muestra representativa de generación de RCD para la segunda etapa del proyecto de estudio de caso:

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Fecha</b>	<b>H(m)</b>	<b>B(m)</b>	<b>L(m)</b>	<b>Ab (m<sup>2</sup>)</b>	<b>b(m)</b>	<b>l(m)</b>	<b>Ac (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V(m<sup>3</sup>)</b>	
Rc+Rb+Otros	12-jun	1.10	2.30	1.72	3.96	1.45	0.80	1.16	2.66	
	27-jun	2.36	3.71	4.4	16.32	3.1	1.8	5.58	24.73	
	17-jul		2.3	3.2	6.2	19.84	2.5	4.45	11.13	35.13
			2.15	2.3	7.6	17.48	1.8	3.5	6.30	24.56
			1.55	3.5	2.6	9.10	2.1	1.6	3.36	9.29
			1.4	3.3	2.4	7.92	2.4	1.36	3.26	7.59
	30-jul		1.92	4.65	3.84	17.86	2.5	1.7	4.25	19.72
			1.8	5.1	1.92	9.79	2.3	0.7	1.61	9.22
			1.1	5.9	7.3	43.07	4.6	4.9	22.54	35.48
			1.6	3.65	3.15	11.50	2.3	1.56	3.59	11.47
	15-ago		1.74	3.57	2.26	8.07	2.17	0.75	1.63	7.73
			1.54	2.81	2.63	7.39	1.16	0.84	0.97	5.67
	29-ago		2.35	2.74	2.15	5.89	1.95	0.9	1.76	8.51
			2.2	2.66	1.95	5.18	1.75	1.3	2.28	7.98
			3.05	2.1	2.4	5.04	1.3	1.1	1.43	9.31
	12-sep		1.8	1.5	1.9	2.85	0.7	0.5	0.35	2.52
			1.95	2.2	2.6	5.72	1.31	1.3	1.70	6.85
			1.1	3.3	1.5	4.95	1.4	0.6	0.84	2.87
	<b>Subtotal (m<sup>3</sup>)</b>									<b>231.31</b>

*Tabla 43. Mediciones del residuo contaminado Rc+Rb+Otros*

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Fecha</b>	<b>H(m)</b>	<b>B(m)</b>	<b>L(m)</b>	<b>Ab (m<sup>2</sup>)</b>	<b>b(m)</b>	<b>l(m)</b>	<b>Ac (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V(m<sup>3</sup>)</b>
Rb	12-jun	1.95	4.1	3.65	14.97	2.37	1.85	4.38	17.84
	27-jun	1.55	3.15	2.65	8.35	1.75	1.46	2.56	8.02
		1.64	3.53	3.45	12.18	1.65	1.84	3.04	11.64
	17-jul	2.5	2.64	3.1	8.18	1.5	2.4	3.60	14.34
		2.3	2.24	2.88	6.45	1.4	1.6	2.24	9.58
	30-jul	1.05	4.6	4.3	19.78	1.6	1.2	1.92	9.75
		1.3	2.8	1.4	3.92	2.1	1.2	2.52	4.15
	15-ago	1.95	4.36	2.41	10.51	1.95	1.26	2.46	11.73
		1.92	4.51	2.37	10.69	1.74	0.95	1.65	10.59
	29-ago	0.64	2.1	1.6	3.36	1.3	0.75	0.98	1.31
		1.24	3.1	1.9	5.89	1.5	0.7	1.05	3.88
	12-sep	0.74	1.4	0.9	1.26	0.55	0.6	0.33	0.55
<b>Subtotal (m<sup>3</sup>)</b>									<b>103.39</b>

*Tabla 44. Mediciones de residuo cerámico Rb*

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Fecha</b>	<b>H(m)</b>	<b>B(m)</b>	<b>L(m)</b>	<b>Ab (m<sup>2</sup>)</b>	<b>b(m)</b>	<b>l(m)</b>	<b>Ac (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V(m<sup>3</sup>)</b>	
Rc	27-jun	0.95	2.25	1.70	3.83	0.70	1.41	0.99	2.14	
		1.27	1.55	1.41	2.19	1.15	0.64	0.74	1.77	
		1.4	1.16	1.54	1.79	0.95	0.74	0.70	1.68	
	17-jul	1.65	1.5	1.9	2.85	0.7	0.5	0.35	2.31	
		1.35	2.25	2.6	5.85	1.31	1.3	1.70	4.82	
		1.1	3.32	1.6	5.31	1.3	0.6	0.78	2.98	
	30-jul	1.34	3.6	2.5	9.00	2.57	1	2.57	7.32	
	29-ago	1.35	2.75	2.35	6.46	1.35	1.44	1.94	5.38	
	<b>Subtotal (m<sup>3</sup>)</b>									<b>28.40</b>

*Tabla 45. Mediciones de residuo de concreto Rc*

## MASAS UNITARIAS

Para determinar las masas unitarias de cada tipo de residuo, se realizó un muestreo en campo consistente en la recolección de tres muestras aleatorias por cada categoría de RCD, seleccionadas

en diferentes puntos de acopio a lo largo del proyecto. Estas muestras fueron pesadas individualmente con el fin de obtener datos precisos sobre su masa. Posteriormente, se calculó un promedio ponderado de los resultados obtenidos, lo cual permitió establecer una masa unitaria representativa para cada tipo de residuo identificado.

<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>Rb</b>
<i>Peso del material (muestra 1)</i>	7.6 Kg
<i>Peso del material (muestra 2)</i>	7.8 Kg
<i>Peso del material (muestra 3)</i>	8.1 Kg
<i>Peso promedio material</i>	7.8 Kg
<i>Volumen del recipiente</i>	.011 m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	725 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	.73 T/m <sup>3</sup>

Tabla 46. Masa unitaria del Rb

<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>Rc</b>
<i>Peso del material (muestra 1)</i>	10.6 Kg
<i>Peso del material (muestra 2)</i>	11.2 Kg
<i>Peso promedio material</i>	10.9 Kg
<i>Volumen del recipiente</i>	.011 m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	1009 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	1.01 T/m <sup>3</sup>

Tabla 47. Masa unitaria del Rc

<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>Rb + Rc +Otros</b>
<i>Peso del material (muestra 1)</i>	9.6 Kg
<i>Peso del material (muestra 2)</i>	8.5 Kg
<i>Peso del material (muestra 3)</i>	9.2 Kg
<i>Peso promedio material</i>	9.1 Kg
<i>Volumen del recipiente</i>	.011 m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	843 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	.84 T/m <sup>3</sup>

Tabla 48. Masa unitaria del Rc+Rb+Otros

<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>Acero</b>
<i>Peso del material (muestra 1)</i>	3.6 Kg
<i>Peso del material (muestra 2)</i>	2.9 Kg
<i>Peso del material (muestra 3)</i>	3.5 Kg
<i>Peso promedio material</i>	3.3 Kg
<i>Volumen del recipiente</i>	.011 m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	308 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	.31 T/m <sup>3</sup>

*Tabla 49. Masa unitaria del residuo de acero*

<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>Tubería</b>
<i>Peso del material (muestra 1)</i>	3.6 Kg
<i>Peso del material (muestra 2)</i>	3.4 Kg
<i>Peso del material (muestra 3)</i>	4.2 Kg
<i>Peso promedio material</i>	3.7 Kg
<i>Volumen del recipiente</i>	.011 m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	346 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso unitario RCD</i>	.35 T/m <sup>3</sup>

*Tabla 50. Masa unitaria del residuo de PVC*

# **PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN**



## CONTENIDO

<b>1. Introducción .....</b>	<b>138</b>
<b>2. Alcance de la guía .....</b>	<b>139</b>
<b>3. Objetivo de la guía .....</b>	<b>141</b>
<b>4. Definición del plan de gestión de RCD .....</b>	<b>141</b>
<b>5. Aspectos técnicos relevantes .....</b>	<b>141</b>
<b>6. Normatividad aplicable .....</b>	<b>143</b>
<b>7. Clasificación de los residuos de construcción y demolición .....</b>	<b>145</b>
<b>8. Etapas constructivas .....</b>	<b>147</b>
<b>9. Principio rector de aprovechamiento .....</b>	<b>148</b>
<b>10. Gestión para los RCD .....</b>	<b>149</b>
<b>11. Medidas y procedimientos de gestión para los RCD en obra .....</b>	<b>151</b>
<b>12. Gestores .....</b>	<b>161</b>
<b>13. Alternativas de aprovechamiento de los RCD .....</b>	<b>163</b>
<b>14. Indicadores de seguimiento de gestión de RCD .....</b>	<b>165</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde al Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) para el macroproyecto de vivienda ubicado en el municipio de Puerto Tejada, Cauca. Este plan se fundamenta en los hallazgos y recomendaciones expuestos en el estudio titulado "Evaluación Técnica y Económica de una Propuesta de Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)"

El macroproyecto contempla la construcción de más de 1.000 unidades de vivienda de interés prioritario en una zona de alta vulnerabilidad social y económica. Debido a la magnitud del proyecto, se estima una generación significativa de RCD, lo que representa un reto ambiental importante. Por esta razón, el presente plan tiene como objetivo principal establecer medidas efectivas para la reducción, reutilización, reciclaje y adecuada disposición final de estos residuos, con el fin de minimizar el impacto ambiental y optimizar los recursos utilizados en el macroproyecto.

El plan se diseñó en cumplimiento de la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), que establece metas claras de aprovechamiento para los RCD generados en municipios de categoría 6 como Puerto Tejada. Esto incluye la obligación de aprovechar al menos el 20% de los RCD generados, excluyendo el material de excavación. Asimismo, el plan promueve la adopción de estrategias de economía circular, aprovechando residuos como concretos, cerámicos, metales, maderas y plásticos en la construcción de nuevas infraestructuras del proyecto.

El documento está dirigido a todos los actores involucrados en el desarrollo del proyecto, incluyendo contratistas, operarios y personal técnico, quienes serán responsables de implementar las medidas descritas. Con esta estrategia, se espera no solo cumplir con la normativa vigente, sino también generar ahorros económicos, mejorar la sostenibilidad del proyecto y contribuir positivamente a la comunidad local

## **2. ALCANCE DEL PLAN DE GESTIÓN**

El presente Plan de Gestión Integral de RCD tiene como alcance establecer las directrices, estrategias y procedimientos necesarios para gestionar adecuadamente los residuos generados durante el desarrollo del macroproyecto estudio de caso.

Este plan abarca todas las fases del ciclo constructivo, desde la planificación y diseño del proyecto hasta la ejecución, seguimiento y cierre de las actividades de construcción, incluyendo procesos de excavación, demolición, obra civil y urbanismo. Se aplicará de forma transversal a las más de 1.000 unidades de vivienda proyectadas, así como a las zonas verdes, vías, andenes, espacios dotacionales y demás componentes de la infraestructura urbana.

Las acciones planteadas están dirigidas a todos los actores involucrados en el proyecto, tales como contratistas, operadores, personal técnico y administrativo, quienes tendrán responsabilidades específicas en la separación en la fuente, almacenamiento temporal, aprovechamiento y disposición final de los RCD.

El plan se desarrollará conforme a la normativa ambiental nacional vigente, especialmente la Resolución 1257 de 2021 del MADS, e incorpora principios de economía circular y producción limpia, con énfasis en la reducción, reutilización y reciclaje de materiales como concretos, cerámicos, metales, plásticos y maderas.

Este documento también establece los indicadores de seguimiento y control, así como los mecanismos de capacitación del personal, con el fin de garantizar una gestión eficiente, responsable y trazable de los RCD, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental del proyecto y a la mejora continua de los procesos constructivos.

## 1.1. LIMITES DEL ALCANCE

Este Plan de Gestión de RCD no contempla los siguientes aspectos, por encontrarse fuera del alcance operativo y normativo definido para el proyecto:

- **Gestión de residuos en etapa de operación post-construcción:**  
El plan se limita a la fase constructiva del proyecto y no contempla la gestión de residuos durante la ocupación o uso de las viviendas una vez entregadas.
- **Actividades fuera del predio definido para el macroproyecto:**  
Las estrategias descritas aplican exclusivamente dentro del terreno destinado al proyecto en Puerto Tejada. No se abordan intervenciones en predios vecinos ni en zonas públicas externas, salvo para el transporte autorizado de RCD.
- **Procesamiento industrial de los RCD fuera de obra:**  
Aunque se contempla la entrega de residuos a gestores autorizados, no se incluye el detalle de procesos de transformación o reciclaje ejecutados por terceros fuera del sitio del proyecto.
- **Disposición final de residuos no contemplada en el plan de obra:**  
El plan no considera la construcción ni operación de sitios de disposición final, siendo esta responsabilidad de gestores externos certificados por la autoridad ambiental competente.
- **Gestión de residuos de contratistas no vinculados al proyecto:**  
El alcance del plan cubre exclusivamente a contratistas, subcontratistas y personal autorizado oficialmente por la empresa constructora. Terceros no vinculados contractualmente quedan fuera de este alcance.

## **2. OBJETIVO DEL PLAN DE GESTIÓN**

Proporcionar una herramienta estratégica para la empresa constructora, alineada con las características específicas del proyecto y sus capacidades económicas, que le permita formular, implementar y mantener vigente un Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición. Este plan tiene como finalidad optimizar la gestión de los RCD generados durante la ejecución de proyectos constructivos, promoviendo su aprovechamiento eficiente y minimizando la disposición final, en cumplimiento con la normativa ambiental vigente y los principios de sostenibilidad en el sector de la construcción.

## **3. DEFINICIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN DE RCD**

Este documento le proporcionará a la empresa constructora una visión clara y estructurada sobre como la aplicación del plan de gestión integral de RCD contribuirá a la reducción de impactos ambientales, el aprovechamiento eficiente de materiales, la minimización de costos operativos y la mejora en el desempeño normativo, por medio del cumplimiento de la Resolución 1257 de 2021, la cual establece las metas de aprovechamiento de RCD generados en obra y es de carácter obligatorio desde noviembre de 2021.

## **4. ASPECTOS TÉCNICOS RELEVANTES**

Este plan integral de gestión contiene información referente a datos del proyecto de construcción, la clasificación de los residuos, las medidas para gestionar eficientemente los RCD, los indicadores de eficiencia, eficacia y efectividad y las estrategias para aprovechar eficientemente los RCD en obra.

### **a. Datos generales de la obra**

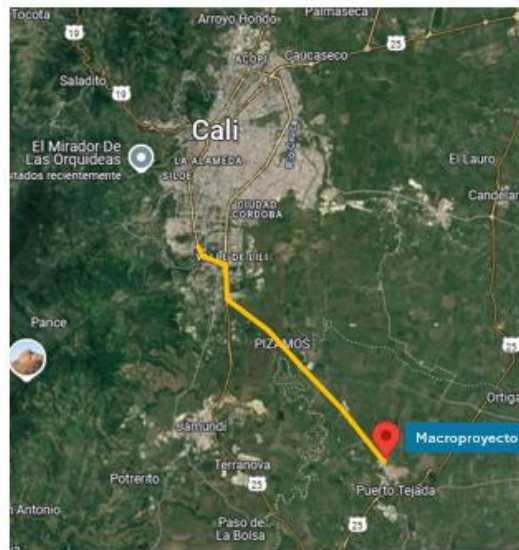
El proyecto se localiza en el municipio de Puerto Tejada (Cauca), y está concebido como un macroproyecto de vivienda de interés prioritario desarrollado bajo la modalidad de urbanismo abierto. Su ejecución se ha planificado por etapas, dentro de un predio con una extensión superior a los 300.000 m<sup>2</sup>, con una proyección total de más de 1.000 unidades de vivienda.

El diseño y construcción del macroproyecto se encuentran debidamente aprobados conforme a los lineamientos de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 y demás normativas técnicas vigentes.

La urbanización contempla una infraestructura integral que incluye zonas verdes arborizadas, andenes en concreto, vías vehiculares con carpeta asfáltica, y espacios dotacionales destinados a la recreación activa y pasiva de jóvenes y adultos, lo que contribuye a la consolidación de un entorno urbano sostenible y habitable.

### **b. Ubicación**

El macroproyecto se encuentra ubicado al norte del municipio de Puerto Tejada (Cauca), sobre la carrera 24 en la vía Cali – Puerto Tejada, tal como se ilustra en la Figura 19:



*Figura 19. Ubicación del proyecto*

## 5. NORMATIVIDAD APLICABLE

La gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) en Colombia se encuentra regulada por el marco normativo ambiental establecido en la Resolución 0472 de 2017, modificado posteriormente por la Resolución 1257 de 2021, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Esta normativa establece de manera jerárquica las fases obligatorias para la adecuada gestión de los RCD, priorizando la prevención y reducción en la fuente, seguida de la recolección y transporte, el almacenamiento temporal, el aprovechamiento de los residuos y, como última alternativa, la disposición final en sitios autorizados.

De acuerdo con los lineamientos establecidos por esta normativa, se definen responsabilidades específicas en función del tipo de generador:

- **Generador de RCD**

Toda persona natural o jurídica, pública o privada, que, en el desarrollo de una actividad de construcción, demolición, remodelación, excavación u otra actividad relacionada, produzca residuos sólidos provenientes de dichos procesos

- **Obligaciones del gran generador de RCD**

De acuerdo con la Resolución 1257 de 2021, se considera gran generador de residuos de construcción y demolición (RCD) a toda persona natural o jurídica, pública o privada, que cumple con al menos una de las siguientes condiciones:

1. Requiere la expedición de licencia de construcción y dicha licencia contempla un área construida igual o superior a 2.000 m<sup>2</sup>.
2. Genere una cantidad igual o superior a 2 m<sup>3</sup> de RCD por día, independientemente del área del proyecto.

Bajo esta clasificación, el gran generador asume una serie de obligaciones técnicas, administrativas y operativas que buscan garantizar una gestión integral de los residuos. Entre sus principales obligaciones se destacan:

- Formular e implementar un Plan de Gestión Integral de RCD en concordancia con lo estipulado por la normativa.

- Registrar el plan ante la autoridad ambiental competente y mantenerlo actualizado.
  - Realizar separación en la fuente y garantizar el manejo diferenciado de residuos aprovechables y no aprovechables.
  - Entregar los residuos a gestores autorizados para su aprovechamiento o disposición final.
  - Reportar periódicamente a la autoridad ambiental la cantidad, tipo de residuos generados, y su destino final.
- **Obligaciones del pequeño generador de RCD**

Según lo establecido en la Resolución 1257 de 2021, se considera pequeño generador de residuos de construcción y demolición (RCD) a aquella persona natural o jurídica cuya actividad constructiva genera menos de 2 m<sup>3</sup> diarios de residuos, o que desarrolla proyectos con un área construida inferior a 2.000 m<sup>2</sup>, y que en algunos casos no requiere la expedición de licencia de construcción.

El pequeño generador no está obligado a formular un Plan de Gestión Integral de RCD, sí debe adoptar prácticas de manejo responsable que permitan garantizar una gestión adecuada de los residuos generados. Entre sus principales obligaciones se destacan:

- Clasificar adecuadamente los residuos.
- Realizar separación en la fuente.
- Acopiar los residuos en lugares adecuados.
- Entregar los residuos al gestor correspondiente.
- Acatar las disposiciones de la autoridad ambiental local en materia de recolección y disposición.

## 6. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Se establece una clasificación específica de los residuos considerando la realidad del macroproyecto y los aspectos más relevantes de las normativas vigentes. En la figura 19 y 20 se presenta la clasificación establecida por la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la cual distingue entre residuos susceptibles de aprovechamiento y no susceptibles de aprovechamiento.

TIPO DE RCD
<b>1. Residuos de construcción y demolición –RCD- susceptibles de aprovechamiento:</b>
1.1. Productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terreno: coberturas vegetales, tierras, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros.
1.2. Productos de cimentaciones y pilotajes: arcillas, bentonitas y demás.
1.3. Pétreos: hormigón, arenas, gravas, gravillas, cantos, pétreos asfálticos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, entre otros.
1.4. No pétreos: vidrio, metales como acero, hierro, cobre, aluminio, con o sin recubrimientos de zinc o estaño, plásticos tales como PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno y de poliuretano, gomas y cauchos, compuestos de madera o cartón-yeso (drywall), entre otros.
<b>2. Residuos de construcción y demolición –RCD- no susceptibles de aprovechamiento:</b>
2.1. Los contaminados con residuos peligrosos.
2.2. Los que por su estado no pueden ser aprovechados.
2.3. Los que tengan características de peligrosidad, estos se regirán por la normatividad ambiental especial establecida para su gestión.

Figura 20. Clasificación de RCD (Resolución 0472 del 2017 MADS)

También se consideró la Norma técnica colombiana NTC 6422 (Icontec, 2021), que aborda la clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados, estableciendo seis grupos de clasificación, R<sub>c</sub>, R<sub>u</sub>, R<sub>b</sub>, R<sub>a</sub>, R<sub>g</sub> y X, la composición de estos grupos se puede observar en la Figura 19.

Componente	Descripción
Rc	Residuos de concreto
	Residuos de productos de concreto
	Residuos de mortero
	Residuos de unidades de mampostería de concreto
Ru	Agregados ligados hidráulicamente
	Agregados no ligados
	Piedra natural
Rb	Residuos de mampostería de arcilla (por ejemplo: ladrillos y tejas)
	Unidades de mampostería de silicato de calcio
	Concreto permeable no flotante
	Residuos de material cerámico
Ra	Residuos de material asfáltico
Rg	Vidrio:
	Residuos de vidrio plano, incluyendo espejos vidrio de borosilicato
	Residuos de faros de automóviles
	Otros vidrios que pueden resultar perjudiciales cuando son incorporados en el concreto (reacción álcalis-silice)
x	<b>Otros:</b>
	Materiales cohesivos (por ejemplo, arcilla y suelo)
	Residuos de concreto o morteros recubiertos con acabados que contienen yeso
	Residuos de concreto o mortero recubiertos con acabados arquitectónicos que puedan contener sustancias dañinas para el concreto
	<b>materiales metálicos magnéticos y no magnéticos:</b>
	Acero, hierro, metal galvanizado, níquel.
	Aluminio, latón, cobre, zinc, plomo, titanio, (se incluye el mármol por su gran densidad).
	<b>Plásticos y caucho no flotante:</b>
	Productos a base de caucho.
	Tuberías en PVC.
	Derivados del polipropileno
	Residuos de fibras sintéticas no aptas para el concreto.
	<b>Material químicamente contaminado o expuesto a ambientes agresivos:</b>
	Ambientes industriales (pesada, metalúrgica, química o similares)
	Contacto directo con el suelo o con ambientes de extrema humedad.
	Contacto directo y prolongado con lixiviados
	Contacto directo con agua de mar.
	Elementos con altos contenidos de pintura o barniz.
	<b>Residuos de materia orgánica:</b>
	Residuos vegetales o masas orgánicas.
	Tierra o lodos.
Residuos de madera no flotantes.	
Residuos de bambú o guadua no flotantes.	
Bareque o adobe.	

Figura 19. Clasificación de RCD (Norma técnica colombiana NTC 6422 del 2021)

Teniendo en cuenta las normativas anteriormente descritas se adoptó el uso de la nomenclatura propuesta en la NTC 6422, adicionalmente se propone la creación de nuevos grupos de clasificación en los casos donde se genere la unión de 2 o más residuos, por ejemplo, en el macroproyecto se encontró un residuo que combinaba residuos de concreto, residuos cerámicos y demás residuos, en este caso, a este tipo de residuo combinado se le denominó Rc+Rb+Otros.

## 7. ETAPAS CONSTRUCTIVAS

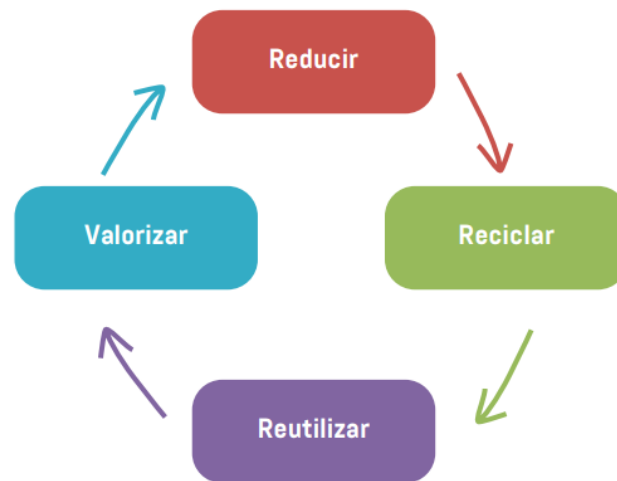
Las etapas constructivas ilustrada en la Figura 21, son las fases en las cuales se desarrollan diferentes actividades del proceso constructivo, que tienen como fin llevar a término un diseño previamente planificado, y corresponden a las siguientes actividades:



Figura 21. Etapas constructivas

## 8. PRINCIPIO RECTOR DE APROVECHAMIENTO

El principio de jerarquía permite garantizar una gestión ambiental basada en el uso racional de materiales que eviten la generación de residuos y una eficaz gestión de los RCD. Estos principios tienen por objeto reducir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción, gestión y fomentar su aplicación. El orden jerárquico para la gestión eficiente de RCD que se presenta en la Figura 22 es: reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, para efectos de aumentar la calidad de vida de la población y velar por un ambiente sano.



*Figura 22. Orden Jerárquico de RCD. Tomado de la Secretaría de ambiente de Bogotá*

Los residuos de construcción y demolición son materiales con un alto potencial de ser aprovechados, debido a su composición de sus materiales. En aquellos lugares en los cuales no se realiza separación de RCD se desaprovechan materias primas, que, con un adecuado tratamiento, podrían ser recicladas o reutilizadas.

Por otro lado, el no aprovechamiento de estos residuos causa problemáticas ambientales como la inadecuada disposición, la reducción de la vida útil de rellenos sanitarios y sitios de disposición final de RCD, e impactos negativos como el cambio paisajístico, la contaminación de fuentes hídricas, la generación de material particulado, la compactación y cambio de uso de los suelos, la colmatación de los sistemas de captación de aguas lluvia, entre otros.



Figura 23. Valorización de los RCD. Tomado de la Secretaría ambiental de Bogotá

## 9. GESTIÓN PARA LOS RCD

Para realizar la adecuada gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD), se tienen en cuenta los siguientes procesos de aprovechamiento:

### a. Demolición selectiva

Una demolición selectiva es un proceso planificado y controlado que permite recuperar y clasificar los materiales con potencial de reutilización o reciclaje antes de que se mezclen o contaminen. Es clave para optimizar el aprovechamiento de los RCD (residuos de construcción y demolición), reducir la cantidad de residuos enviados a disposición final y disminuir costos.

### b. Reutilización

La reutilización es un proceso clave dentro de la gestión integral de RCD, consiste en volver a utilizar un material o residuo sin necesidad de transformarlo ni someterlo a procesos industriales. Es decir, el material conserva sus propiedades físicas y funcionales originales, lo cual lo convierte en una opción eficiente, sostenible y económica para su reincorporación en el ciclo constructivo.

Este proceso ofrece nuevas alternativas de aplicación para elementos que, de otra manera, serían descartados. Por ejemplo, piezas de madera, bloques, ladrillos enteros, puertas, ventanas, elementos metálicos, entre otros, pueden ser reaprovechados para cumplir funciones similares o adaptadas en la misma obra o en otros proyectos.

La reutilización se puede llevar a cabo directamente en la obra donde se generaron los residuos, lo cual facilita su control, reduce costos de transporte y disminuye la necesidad de adquirir nuevos materiales. Sin embargo, también es posible trasladar estos materiales a otras obras, siempre y cuando se garantice su correcto manejo y trazabilidad.

En estos casos, cuando los RCD son reutilizados en una obra diferente a aquella donde fueron generados, es obligatorio reportar esta acción en el Plan de Gestión de RCD del proyecto correspondiente. Asimismo, debe notificarse previamente a la autoridad ambiental competente, como la Secretaría Distrital de Ambiente, para asegurar el cumplimiento de la normatividad vigente y la adecuada trazabilidad de los residuos aprovechados.

La implementación de prácticas de reutilización en obra no solo contribuye al cumplimiento de metas ambientales y regulatorias, sino que también fortalece la sostenibilidad del proyecto, reduce la generación de residuos, minimiza el consumo de recursos naturales y promueve una economía circular dentro del sector de la construcción.

### **c. Reciclaje**

Esta fase se describe como el proceso donde los residuos de construcción y demolición son recolectados y transformados en nuevos materiales, que puedan ser reincorporados a los ciclos productivos y utilizados como nuevos productos o materias primas. Para que el reciclaje sea efectivo se debe implementar desde un programa integral, teniendo en cuenta la composición de los residuos, la disponibilidad de mercados para los materiales reciclados, la situación económica de la región y la participación de la comunidad. En el proceso de reciclaje se puede recurrir al uso de plantas móviles, que permiten procesar los RCD en el lugar donde se está llevando a cabo la obra.

#### **d. Gestión de residuos peligrosos**

Según la normatividad nacional vigente para este tema, todas las obras deben garantizar la gestión y manejo integral de los residuos o desechos peligrosos que genera, para lo cual debe cumplir con las obligaciones del generador estipuladas en el artículo 10 del Decreto 4741 de 2005 “por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.” Para realizar la entrega de los residuos peligrosos generados en obra se debe contactar a un gestor de residuos peligrosos autorizado por la autoridad ambiental.

### **10. MEDIDAS Y PROCEDIMIENTOS DE GESTIÓN PARA LOS RCD EN OBRA**

Para gestionar eficientemente los RCD generados en obra y teniendo en cuenta la clasificación de cada uno de ellos de acuerdo con el numeral 6.4.2, se plantean las siguientes medidas para proporcionar un manejo adecuado de los RCD que propicien su aprovechamiento.

#### **a. Minimizar la generación de RCD en obra**

Para alinear el proyecto con un enfoque de producción limpia se deben plantear acciones con el fin de prevenir o minimizar la generación de RCD, esto no solo va a contribuir a reducir la cantidad de residuos sino también permite que la gestión sea más eficiente y eficaz.

Para ello, se plantean las siguientes estrategias

- **Fase de diseño**
  - Priorizar los materiales que se encuentren dentro de la categoría de “Residuos aprovechables”.
  - Plantear tipologías de viviendas estandarizadas para mejorar la planificación del uso de materiales.
  - Seleccionar materiales duraderos y con una larga vida útil.
  - Diseñar con dimensiones de materiales estandarizados para evitar cortes y generación de residuos.

- **Fase de construcción**

- Solicitar requerimientos de materiales en función del rendimiento de construcción.
- Estandarizar las cantidades de materiales por unidad de vivienda.
- Prohibir la disposición de residuos en sitios no autorizados dentro de la obra.
- Plantear estratégicamente la ubicación de los acopios de materiales para minimizar el trasiego de ellos.

**b. Inventario de materiales**

- **Reducir el stock de materiales:** se debe plantear un cronograma de solicitud de materiales con el fin de adquirir la cantidad necesaria para las actividades de acuerdo con la programación de obra. Esto permite adquirir solo las cantidades necesarias en el momento oportuno, evitando excedentes que puedan deteriorarse y convertirse en residuos.
- **Inventarios periódicos:** Se deben realizar inventarios mensuales para identificar materiales próximos a vencerse, insumos sin rotación en obra y aquellos que presentan deterioro o daños. Con esta información, se pueden establecer protocolos de manejo adecuados, priorizando su uso, reasignación o disposición responsable, con el objetivo de reducir desperdicios y optimizar recursos en la obra.

**c. Demolición selectiva**

En el caso en que dentro del desarrollo del proyecto se requieran actividades de demolición, se recomienda implementar un protocolo que permita maximizar el aprovechamiento de los residuos con potencial de valorización y, al mismo tiempo, garantizar que únicamente los residuos no susceptibles de aprovechamiento sean destinados a disposición final.

A continuación, se detallan los procesos para realizar una demolición selectiva de forma correcta, adaptados al contexto del macroproyecto de vivienda de interés prioritario en Puerto Tejada:

- **Planeación previa**

- Realizar un diagnóstico técnico del edificio o estructura a intervenir, identificando los tipos de materiales presentes.
- Elaborar un plan detallado de demolición selectiva, que incluya cronograma, responsables, procedimientos, medidas de seguridad y rutas de evacuación de materiales.
- Coordinar con el equipo técnico y de gestión ambiental el inventario de materiales reutilizables o reciclables.

- **Desconexión de servicios**

Asegurar la desconexión segura de redes de agua, electricidad, gas, telecomunicaciones y sanitarias, evitando riesgos y contaminación.

- **Extracción de elementos no estructurales**

Retirar manualmente los elementos desmontables y materiales sueltos como:

- Puertas, ventanas, marcos.
- Accesorios sanitarios, griferías, equipos de iluminación.
- Instalaciones eléctricas, tuberías, conductos.
- Cielorrasos, revestimientos, pisos flotantes.
- Muebles empotrados o divisiones interiores.
- Clasificar y almacenar temporalmente estos elementos según su tipo y posibilidad de reutilización o reciclaje.

- **Separación en la fuente**

- Implementar puntos de acopio diferenciados dentro del sitio para materiales como: Madera, Metales (acero, cobre, aluminio), Cerámica, Plásticos, Vidrio, Material pétreo, residuos cerámicos y provenientes del concreto.
- Evitar mezclar residuos para preservar la calidad del material aprovechable.

- **Demolición estructural controlada**
  - Ejecutar la demolición de muros, techos y elementos estructurales de forma secuencial y segura, usando maquinaria o técnicas manuales según el caso.
  - Durante esta etapa, mantener la separación de materiales lo más limpia posible.
  - Priorizar métodos que reduzcan el daño a los materiales recuperables (por ejemplo, cortes limpios en vez de roturas).
  
- **Transporte interno y almacenamiento temporal**
  - Trasladar los residuos clasificados a un Sitio de Almacenamiento Temporal (SAT) bien señalizado y protegido.
  - Minimizar el tiempo de permanencia para evitar deterioro o contaminación de los materiales.
  
- **Entrega a gestores o reincorporación en obra**

Determinar qué materiales pueden:

  - Ser reutilizados en la misma obra.
  - Ser enviados a reciclaje por gestores autorizados.
  - Asegurar la trazabilidad de los residuos mediante registros en el Plan de Gestión de RCD.

#### **d. Excavaciones**

Dentro de las actividades de excavación propias de la fase inicial del proyecto, se recomienda implementar prácticas diferenciadas para optimizar la gestión de los residuos generados y facilitar su aprovechamiento, minimizando la necesidad de disposición final:

- **Descapote**

Esta actividad consiste en la remoción de la capa superficial del terreno, compuesta principalmente por suelo orgánico y vegetación. Se recomienda cuantificar el volumen de descapote de forma independiente al volumen total de excavación, ya que este

material, por su alto contenido orgánico, no es apto para actividades de relleno o conformación de estructuras y debe ser gestionado como residuo no aprovechable.

- **Excavaciones**

El material proveniente de excavaciones más profundas, correspondiente a suelos inertes (limos, arcillas, gravas o arenas, dependiendo de la tipología del suelo del proyecto), podrá ser aprovechado en diferentes actividades dentro del mismo proyecto, tales como:

- Conformación de zonas verdes y parques.
- Rellenos de antejardines y zonas de urbanismo.
- Nivelación del terreno.

#### **e. Capacitación al personal de obra**

Para garantizar una gestión eficiente de los residuos de construcción y demolición (RCD), es esencial la capacitación del personal involucrado en el proyecto, a incluir tanto el equipo administrativo como el operativo. La capacitación se desarrollará en diferentes fases, asegurando la concientización ambiental, el cumplimiento normativo y la implementación de estrategias de aprovechamiento de residuos.

- En la reunión inicio del proyecto se abordarán temas clave sobre concientización ambiental, resaltando aspectos clave como: contaminación, afectación a la salud humana, cumplimiento de normativa y los beneficios económicos. Esta primera capacitación irá dirigida al director de obra, residentes y almacenistas.
- En el comité de inicio de actividades se explicará cual es la afectación ambiental y sanitaria de una gestión ineficiente de los RCD, resaltando los beneficios de aprovechamiento y estableciendo lineamientos para su incorporación en obra.
- Se realizará una explicación de los tipos de residuos generados en la obra y su clasificación de acuerdo con lo establecido en el numeral 6.4.2, se resaltarán la diferencia entre residuos limpios y contaminados y su impacto en el potencial de aprovechamiento.

- Se llevará a cabo una reunión en donde asistan directores, residentes, maestros y personas encargadas de la gestión de los RCD en obra, donde se explicará la normativa vigente y las estrategias para su cumplimiento.
- Se presentará el documento de plan de gestión integral de RCD a todo el equipo de obra para su socialización, promoviendo su comprensión, participación y compromiso en la ejecución.
- Se definirán responsables en obra para supervisar la correcta gestión de los RCD en cada fase del proyecto.
- Se realizarán reuniones de seguimiento mensual, donde se identificarán dificultades, se propondrán mejoras y se establecerán metas periódicas para optimizar la gestión de residuos.
- Se fomentará una comunicación activa entre los equipos de trabajo, facilitando la coordinación en la separación en la fuente, acopio y preparación de RCD para su aprovechamiento en la obra.

#### **f. Separación en la fuente (SSF)**

Para garantizar una gestión eficiente de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra, es fundamental la implementación de un sistema de separación en la fuente (SSF). Este proceso permite maximizar el aprovechamiento de residuos, reducir la cantidad de residuos enviados a disposición final y optimizar costos operativos. La separación en la fuente se desarrollará a través de una estrategia estructurada en diferentes fases:

- **Clasificación de los RCD en obra**
  - Se debe explicar cuáles son los principales tipos de residuos generados en obra, resaltar la diferencia entre residuos aprovechables tales como: concreto, cerámicos, pétreos, maderas, aceros y plásticos, y los residuos no aprovechables tales como: residuos contaminados, peligrosos o sin características de aprovechamiento.
  - Se debe comunicar al personal de obra las medidas de manipulación y control de los residuos, por medio de carteles, señalizaciones, boletines informativos.

- **Implementación del SSF**

- Se deben establecer ubicaciones estratégicas de puntos de acopio de RCD en obra, en las cuales se deben colocar cerramientos para aislar cada tipo de residuos y evitar la contaminación entre ellos. Estos puntos de acopio deben garantizar el acceso de maquinarias para la ubicación de los RCD y al mismo tiempo deben garantizar el espacio suficiente para que no se presente una colmatación entre espacios.
- Se propone que se dispongan dos sitios de acopio de RCD, un primer acopio donde se lleven los RCD por cada categoría y se almacenen en un plazo máximo de una semana y al finalizar la semana se trasladen hacia el segundo acopio el cual contará con una mayor área y se almacenaran los RCD hasta que sean retirados para incorporarlos en las actividades de aprovechamiento.
- Cada punto de acopio debe contar con señalizaciones en las cuales se exponga el nombre del tipo de residuo.
- Se proponen unas dimensiones para el primer punto de acopio de mínimo 3m x 3m para cada tipo de RCD, se debe instalar el cerramiento con guadua, cuarterones y malla para propiciar la separación entre cada categoría. Un ejemplo de ello se ilustra en la Figura 24:



*Figura 24. Acopios temporales por tipo de residuo*

- Se puede incorporar un sistema de colores para clasificar cada tipo de residuo y evitar confusiones entre todo el personal de obra. De tal forma que, por ejemplo,

el verde represente al residuo cerámico, el azul al residuo de concreto, el amarillo al residuo de PVC, el rojo a los residuos peligrosos.

- Se propone instalar cubiertas a los acopios temporales para evitar la afectación del residuo a causa de lluvias. Ver Figura 25.



*Figura 25. Acopio de residuos*

#### **g. Sitio de almacenamiento temporal (SAT)**

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el Sitio de Almacenamiento Temporal (SAT) tiene como finalidad acopiar los residuos de construcción y demolición (RCD) durante un período máximo de una semana, garantizando su correcta clasificación y facilitando su posterior aprovechamiento. Su ubicación será estratégicamente seleccionada dentro de la obra, asegurando accesibilidad para el transporte de residuos y evitando interferencias con las actividades constructivas.

Para su construcción, se propone un área de 3m x 3m con una altura libre de 5m, estructurado con una cubierta de teja de zinc que protege los residuos de la exposición a condiciones climáticas adversas como lluvias y vientos.

Además, se establecen las siguientes recomendaciones para su adecuado funcionamiento:

- Se debe prohibir la disposición de los RCD en zonas no autorizadas dentro del proyecto, con el fin de promover la separación en la fuente.
- Los residuos se deben acopiar en una zona que se encuentre seca y libre de contaminación de otro tipo de residuos.
- Se debe garantizar un fácil acceso para disponer los residuos y posteriormente trasladarlos al siguiente punto de almacenamiento de RCD en obra.
- Los residuos peligrosos deben tener un manejo diferenciado y deben contar con un protocolo de manejo y disposición para ellos.
- Las personas responsables de la gestión de los RCD en obra deben realizar visitas constantes a los puntos de acopio para verificar que se esté cumpliendo con los lineamientos establecidos para garantizar su efectividad.
- Se deberán elaborar informes mensuales para documentar y analizar los inconvenientes detectados en los puntos de acopio, permitiendo identificar fallas en la clasificación, almacenamiento o traslado de los RCD.
- Se establecerán propuestas de mejora que optimicen la operatividad del sistema de acopio, reduciendo riesgos y maximizando el aprovechamiento de los residuos

#### **h. Sitio de almacenamiento de residuos (SAR)**

El sitio de almacenamiento de RCD será el punto donde se trasladarán los residuos provenientes del primer punto de acopio SAT. Su diseño y operación garantizarán una gestión eficiente de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), con el fin de asegurar su adecuada clasificación, pesaje y preparación para el aprovechamiento o disposición final.

Para optimizar su funcionamiento, el SAR contará con zonas delimitadas para cada tipo de residuo, tales como cerámicos, concretos, aceros, PVC, maderas, entre otros, con el objetivo de evitar la contaminación entre materiales y maximizar su potencial de reutilización y reciclaje.

En este espacio se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- Se determinará el peso de cada residuo almacenado, empleando métodos de pesaje directo para aquellos residuos que lo permitan.

- En los casos donde el pesaje directo no sea viable, se aplicarán índices de masa unitaria, previamente investigados y verificados por el personal responsable de la gestión de RCD en obra.
- Se establecerá un área específica dentro del SAR para la preparación y tratamiento de los residuos que serán incorporados en las estrategias de aprovechamiento dentro de la obra. Esta zona permitirá el acondicionamiento de los materiales, como trituración, clasificación o mezcla, según las necesidades del proyecto.
- Se implementará una bitácora de control donde se registrará el volumen de RCD recibido desde el primer punto de acopio, volumen de RCD reutilizado en obra de acuerdo con las estrategias de aprovechamiento establecidas, volumen entregado a gestores externos y volumen de RCD enviado a disposición final en los casos donde no sea posible su aprovechamiento.
- Se garantizará la limpieza y organización del SAR para evitar la acumulación de residuos no gestionados y prevenir la contaminación cruzada entre materiales.
- Se implementarán protocolos para realizar un mantenimiento al SAR con el fin de garantizar que este punto se encuentre en óptimas condiciones para almacenar los RCD.
- Se designará un equipo encargado de la recepción, almacenamiento y entrega de RCD tanto para aprovechamiento interno en la obra como para su retiro por gestores externos.

#### **i. Retiro y disposición final**

Para los residuos no susceptibles de aprovechamiento, se deberá contactar y coordinar con los gestores autorizados para su recolección, transporte y disposición final, garantizando que estas actividades se realicen bajo los lineamientos establecidos por la autoridad ambiental competente.

Adicionalmente, se deben tener en cuenta los siguientes lineamientos:

- Verificar que los gestores cuenten con licencias y permisos vigentes para la disposición final de RCD.

- Hay que asegurarse que los sitios de disposición final cumplan con las normativas ambientales y de seguridad para el almacenamiento de estos residuos.
- Capacitar al personal para diferenciar los residuos con potencial de aprovechamiento de aquellos que deben ser eliminados.
- Establecer cronogramas de recolección y transporte para evitar acumulaciones innecesarias de residuos en la obra.
- Exigir a los gestores la entrega de certificados de disposición final para validar que los residuos han sido gestionados correctamente.

## **11. GESTORES**

Se debe identificar y seleccionar a los gestores de RCD, quienes pueden ser personas naturales o jurídicas responsables de la recolección, transporte, almacenamiento, aprovechamiento y/o disposición final de los residuos de construcción y demolición. Para garantizar una gestión eficiente y alineada con la normativa ambiental vigente, se debe establecer un proceso de selección y comunicación estructurado con estos actores.

Para ello se debe tener en cuenta la siguiente:

- Realizar una investigación sobre los gestores de RCD registrados y certificados ante la autoridad ambiental competente.
- Verificar que los gestores cuenten con licencias y permisos vigentes para la operación de transporte, tratamiento y disposición final de RCD.
- Identificar qué tipo de gestión ofrecen (recolección, transporte, tratamiento, valorización, disposición final, etc.).
- Coordinar la entrega de los RCD que no van a ser aprovechados en obra, estableciendo frecuencias de recolección y transporte.
- Priorizar a los gestores que realizan aprovechamiento de los RCD, tales como chatarra, plástico, cartón.
- Fomentar alianzas estratégicas con fundaciones y organizaciones sin ánimo de lucro que puedan beneficiarse del aprovechamiento de residuos plásticos generados en la obra.

- Establecer convenios formales en los que se acuerde la entrega periódica de estos residuos, permitiendo que las fundaciones los comercialicen y destinen los recursos obtenidos a la compra de insumos y financiamiento de sus actividades sociales.
- Identificar gestores especializados en el aprovechamiento de RCD pétreos, a través de la transformación de estos.
- Identificar gestores que se encarguen del transporte y disposición final de los residuos peligrosos o no susceptibles de aprovechamiento.

A continuación, en las Tablas 51 y 52 se detallan algunos de los gestores que se encuentran avalados por la autoridad ambiental competente de cada ciudad o municipio:

<b>GESTORES AVALADOS POR LA CRC - PUERTO TEJADA</b>	
Nombre o razón social	Asociación de discapacitados del valle
Número de identificación o NIT	805.019.832-5
Representante legal	María Emilia Aristizábal
Número de contacto	6633385
Actividad prestadora	Aprovechamiento de RCD no pétreos
Nombre o razón social	Álvaro Vásquez y CIA
Número de identificación o NIT	891.304.491-1
Representante legal	Álvaro Enrique Vásquez
Número de contacto	3105052340
Actividad prestadora	Aprovechamiento de RCD pétreos
Nombre o razón social	ASERHI S.A E.S.P
Número de identificación o NIT	830.502.455
Representante legal	Gilberto Velasco Rosero
Número de contacto	3162771772
Actividad prestadora	Disposición final de residuos peligrosos
Nombre o razón social	ESAI S.A.S
Número de identificación o NIT	901.079.339-1
Representante legal	José Janer Lara
Número de contacto	3178878299
Actividad prestadora	Disposición final

*Tabla 51. Gestores de RCD en Puerto Tejada*

<b>GESTORES AVALADOS POR LA CVC - VALLE DEL CAUCA</b>	
Nombre o razón social	Rocales y concretos S.A.S
Número de identificación o NIT	800.205.166
Representante legal	Claudia Inés Pabón
Número de contacto	3146781986
Actividad prestadora	Aprovechamiento de RCD pétreos
Nombre o razón social	Metales Suarez
Número de identificación o NIT	901.255.834
Representante legal	Cesar Antonio Suarez
Número de contacto	602-8856257
Actividad prestadora	Transporte y recolección de chatarra
Nombre o razón social	Asociación de discapacitados del valle
Número de identificación o NIT	805.019.832-5
Representante legal	María Emilia Aristizábal
Número de contacto	6633385
Actividad prestadora	Aprovechamiento de RCD no pétreos
Nombre o razón social	Arquitectura moderna ambiental E.S.P S.A
Número de identificación o NIT	901.210.926-4
Representante legal	Yolanda Zamudio Tovar
Número de contacto	3154843288
Actividad prestadora	Almacenamiento en punto limpio y disposición final

*Tabla 52. Gestores de RCD en el Valle del Cauca*

## **12. ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO PARA LOS RCD**

Los residuos de construcción y demolición (RCD) se caracterizan por poseer un alto potencial de aprovechamiento, lo cual permite su reincorporación en el ciclo productivo de la construcción mediante procesos de reutilización o reciclaje. No obstante, es importante destacar que no todos los RCD son susceptibles de ser aprovechados, ya sea por su naturaleza, su estado de contaminación, o porque presentan características fisicoquímicas que impiden su uso en actividades constructivas. En estos casos, dichos residuos deberán ser gestionados adecuadamente y encaminados a disposición final en sitios autorizados, conforme a lo establecido por la normativa ambiental vigente.

Para garantizar el aprovechamiento de los RCD dentro del proyecto constructivo, es fundamental que estos no se encuentren contaminados con otros materiales o residuos peligrosos y que, a su vez, se haya implementado adecuadamente la separación en la fuente, el almacenamiento temporal por categorías y las demás estrategias de gestión detalladas previamente en este plan.

A continuación, se presenta la Tabla 53 con diversas alternativas de aprovechamiento de los RCD generados en obra:

<b>RESIDUO</b>	<b>PROCESO</b>	<b>ALTERNATIVA</b>
Concreto	Reutilización Reutilización Reciclaje Reciclaje	Relleno estructural Estabilización de vías Fabricación de bloques no estructurales Árido para sustitución de grava en concretos
Cerámicos	Reutilización Reciclaje	Mejoramiento de la subrasante Árido fino para sustitución parcial en morteros
Aceros	Reciclaje	Producción de acero
Asfaltos	Reciclaje	Producción de asfalto
Madera	Reutilización Reciclaje	Combustible para procesos industriales Tableros y aglomerados
Metales	Reciclaje	Fundición para nuevos productos metálicos
Vidrio	Reciclaje Reciclaje	Agregado decorativo para concreto Fabricación de nuevos vidrios
Pétreos	Reutilización Reutilización Reutilización	Sustitución parcial de la subbase para vías Estabilización de suelos Áridos finos o gruesos
Plástico	Reciclaje Reciclaje	Producción de nuevos productos plásticos Aislantes para uso en la construcción

*Tabla 53. Alternativas de aprovechamiento de RCD*

### 13. INDICADORES DE SEGUIMIENTO DE GESTIÓN DE LOS RCD.

Para garantizar un monitoreo eficiente de la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra, se empleará el “Formato único para la formulación e implementación del programa de manejo ambiental de RCD” establecido en la Resolución 1257 de 2021, el cual es un instrumento obligatorio para documentar y controlar la generación, segregación, aprovechamiento y disposición final de los RCD.

Asimismo, se adoptarán los lineamientos del Decreto 507 de 2023 de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, el cual refuerza la trazabilidad de los RCD y establece la obligación de reportar información detallada sobre la gestión de estos residuos. Según este decreto, se deberán presentar los siguientes informes:

- **Informe de generación mensual:** Durante la ejecución de la obra, la empresa deberá presentar un informe mensual en el que se registre la cantidad de residuos generados, segregados, aprovechados y dispuestos finalmente.
- **Registro documental:** Se debe incluir evidencia documental como fotografías, actas de entrega de residuos a gestores, certificaciones de disposición final e informes de seguimiento en obra.

Adicionalmente, se deben incluir los siguientes indicadores que son clave para evaluar la eficiencia en la gestión de RCD.

- **Indicador de eficiencia**

Este indicador permite conocer cuál fue la inversión realizada mensualmente para la gestión de los RCD con respecto a lo calculado y presentado en el plan de gestión.

$$\frac{\text{Gastos mensuales de la implementación del PG al mes}}{\text{Presupuesto planeado para la ejecución del PG}} \times 100$$

- **Indicador de eficacia**

Con este indicador se puede verificar que el volumen mensual de RCD aprovechado en la obra respecto al volumen generado este alineado con las estrategias de aprovechamiento y con los datos reportados a la entidad competente.

$$\frac{\text{Volumen de RCD aprovechado por mes}}{\text{Volumen de material utilizado para la ejecución de obra al mes}} \times 100$$

- **Indicador de efectividad**

Con este indicador se podrá hacer seguimiento a la cantidad de RCD que se está llevando directamente a disposición final en función del volumen de RCD generado al mes.

$$\frac{\text{Volumen de RCD mensual llevado a disposición final}}{\text{Volumen de RCD generado al mes}} \times 100$$

Finalmente, viabilizar la implementación de un Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) no es solo una exigencia normativa: es, sobre todo, una oportunidad para transformar la forma en que el sector constructor se relaciona con el entorno. En este documento se ha presentado una guía clara, estructurada y adaptada a las realidades del proyecto y a las capacidades de la empresa constructora, con el firme propósito de contribuir al cumplimiento de la normativa ambiental vigente y, al mismo tiempo, demostrar que la sostenibilidad es compatible con la eficiencia y la rentabilidad.

Cada etapa del plan ha sido concebida para facilitar la toma de decisiones responsables, para motivar la acción y para evidenciar que, más allá de un deber, gestionar adecuadamente los residuos es una oportunidad de mejora continua. Las estrategias propuestas permiten no solo reducir los impactos negativos en el medio ambiente, sino también optimizar recursos y aprovechar los residuos como insumos valiosos dentro del mismo proceso constructivo.

El sector de la construcción tiene una responsabilidad ineludible con la sostenibilidad, y este plan es un paso hacia la transformación cultural y técnica que el momento exige. Seguir los lineamientos aquí planteados significa comprometerse con un modelo de desarrollo más limpio, más consciente y eficiente.

## **ESTRATEGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE RCD EN OBRA**

Con los resultados obtenidos en el capítulo de resultados y análisis, se lograron identificar patrones clave en las principales actividades generadoras de residuos de construcción y demolición (RCD), destacándose los residuos de concreto (Rc) y los residuos cerámicos (Rb) como los materiales predominantes. El análisis de la generación de RCD en la primera y segunda etapa del proyecto permitió enfatizar la importancia de implementar estrategias de aprovechamiento, no solo para cumplir con los requerimientos de la Resolución 1257 de 2021 del MADS, que exige un aprovechamiento mínimo del 20% de los residuos generados para los municipios de sexta categoría y con año de finalización del 2029, sino también para contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental del proyecto.

En el desarrollo de estas dos primeras etapas, se evidencia que actividades como la fundición de dovelas, la fundición de andenes y huellas, y el corte, manipulación y trasiego de ladrillos al punto de entrega generaron la mayor cantidad de RCD. Un aspecto relevante es que los residuos cerámicos provenientes del corte de ladrillos se categorizaron como "No contaminados", lo cual mejora su potencial para ser reutilizados o reciclados en otras actividades del proyecto. Por el contrario, los residuos generados en la fundición de dovelas, huellas y andenes se clasificaron como "Residuos Contaminados", destacando la necesidad de implementar estrategias específicas para posibilitar su reutilización en diferentes aplicaciones constructivas.

Tras un análisis exhaustivo de las estrategias de aprovechamiento de RCD a través de la revisión del estado del arte y de una evaluación enfocada en las características propias del proyecto y las capacidades de la empresa constructora, se presenta a continuación una tabla resumen. En la Tabla 54 se detallan el tipo de residuo, su posible aplicación, las ventajas asociadas a su aprovechamiento y las limitaciones a considerar.

<b>Categoría</b>	<b>Residuo</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Reutilización	Cerámico	Incorporación del 30% RCD cerámico al suelo para construcción de vías (Hidalgo, 2022)	Incremento del CBR Menor plasticidad Mayor capacidad portante	No aplica para vías principales
Reutilización	Cerámico y concreto	Estabilización de la subrasante por inclusión de RCD al suelo (Quispe, 2020)	Incremento de la capacidad portante del suelo	No se pueden combinar los Rb y los Rc para la estabilización.
Reciclaje	Concreto	Concreto con sustitución de RCD derivados del concreto (Soutsos, 2011)	Disminuye el requerimiento de materia prima natural para agregados	Re requiere equipo especializado para reducir su tamaño nominal
Reutilización	Cerámico	Incorporación del 25%-35% de RCD cerámico a la estructura de subbase para vías (Reyes, 2019)	Aprovechamiento del RCD generado en obra	Resistencia máxima de 17 Mpa.
Reciclaje	Concreto	Elaboración de subbases granulares con RCD (Peña, 2018)	Reducción de costos en comparación con los agregados naturales	Se debe ajustar la curva granulométrica para cumplir con normativa

*Tabla 54. Estrategias de aprovechamiento de RCD*

Como se detalla en la Tabla 54, varias de las alternativas de aprovechamiento se centran en el mejoramiento de la subrasante mediante la incorporación de residuos cerámicos (Rb). Una de las principales ventajas de estas estrategias es que el tamaño nominal que se requiere del residuo cerámico es de ¾” el cual se puede obtener a través de una trituración por medio de maquinaria amarilla y no se hace necesario tener una trituradora, lo que resulta crucial dado que las capacidades actuales de la empresa constructora no contemplan una inversión significativa en equipos o tecnologías para la transformación de residuos. Por lo tanto, las estrategias seleccionadas deben estar totalmente alineadas con las capacidades y recursos disponibles, asegurando su viabilidad técnica y económica.

El suelo del proyecto de estudio de caso se caracteriza por ser un suelo limo arcilloso de media capacidad portante, lo que implica desafíos significativos para la construcción. Según el estudio de suelos, este tipo de terreno requiere una capa de mejoramiento con material importado tipo

Roca Muerta o subbase granular, con espesores de entre 30 y 40 cm, tanto para la conformación de las terrazas como de las vías. Este requerimiento incrementa considerablemente los costos directos del proyecto debido a la necesidad de adquirir y transportar grandes volúmenes de material. Por esta razón, existe una necesidad evidente de identificar y adoptar alternativas más sostenibles y económicas para el mejoramiento del terreno.

Las alternativas seleccionadas para una posible incorporación en el proyecto, alineadas con las necesidades específicas y las capacidades de la empresa, son las siguientes:

**1. *Reemplazo del 20% de roca muerta en la estructura de las terrazas***

Esta estrategia contribuye a reducir el volumen de material importado, el cual es requerido para la conformación de la estructura de cimentación de las viviendas.

**2. *Mejoramiento de la subrasante mediante la incorporación del 30% de RCD cerámico en vías locales:***

Esta estrategia no solo reduce el volumen de material importado necesario, sino que también reutiliza un residuo predominante en el proyecto, disminuyendo el impacto ambiental y los costos asociados al transporte y disposición final de los RCD.

**3. *Incorporación de RCD en la preparación de mezclas de concreto:***

Esta alternativa aprovecha los RCD como reemplazo parcial de agregados, maximizando su utilidad dentro del ciclo constructivo del proyecto.

Estas estrategias no solo están diseñadas para resolver problemas puntuales, como la baja capacidad portante del suelo y la gestión de los RCD, sino que también ofrecen beneficios económicos, ambientales y operativos. Estas alternativas representan un enfoque integral que permite optimizar los recursos del proyecto mientras se alinea con las normativas ambientales vigentes y los principios de sostenibilidad.

**a. *Incorporación del RCD en la preparación de mezclas de concreto***

En el marco del proyecto de estudio de caso, se estima que cada unidad de vivienda genera aproximadamente 4.35 m<sup>3</sup> de RCD, predominando los residuos de concreto y cerámicos. Con un total de más de 5,000 unidades de vivienda proyectadas, esto equivale a la generación de aproximadamente 21,750 m<sup>3</sup> de RCD, que, de mantener las prácticas actuales, serían enviadas directamente a sitios de disposición final. Este enfoque no solo afecta negativamente el medio ambiente, sino que también repercute en la salud humana debido a la contaminación asociada.

Dado el volumen significativo de residuos, resulta imprescindible evaluar técnicamente alternativas complementarias al aprovechamiento de RCD cerámico en el mejoramiento de subrasantes. Una opción identificada en la literatura es la incorporación de estos residuos en el diseño de mezclas de concreto no estructural con una resistencia de 21 MPa.

De acuerdo con la tesis de (Devia, 2021) los concretos no estructurales que incorporaron 10% y 20% de RCD cerámico como reemplazo del agregado grueso alcanzaron resistencias superiores a los 21 MPa a los 28 días. Estas mezclas utilizaron residuos cerámicos triturados con un tamaño de partícula de  $\frac{3}{4}$ ". Aunque presentaron un asentamiento un 25% inferior al concreto convencional preparado en obra sin RCD, se observó que, a mayor porcentaje de incorporación, el asentamiento del concreto incrementaba.

Por otro lado, (Martínez, 2021) evaluó concretos no estructurales fabricados en obra con la incorporación de 10%, 20%, y 33% de residuos cerámicos como sustituto del triturado grueso. Los resultados mostraron resistencias a compresión de 15.7 MPa, 24.19 MPa y 20.92 MPa, respectivamente, en comparación con una muestra de referencia de 15 MPa. La investigación concluyó que la resistencia a compresión aumenta proporcionalmente con el porcentaje de RCD cerámico. Según Martínez, este comportamiento se debe a la alta capacidad de absorción de agua del residuo cerámico, lo que reduce la relación agua/cemento y, en consecuencia, incrementa la resistencia del concreto.

Ambas investigaciones destacan la importancia de utilizar un tamaño de partícula de  $\frac{3}{4}$ " para el residuo cerámico y de controlar cuidadosamente el volumen de agua incorporado en la mezcla, dado que estos residuos tienden a absorber una mayor cantidad de agua en comparación con el triturado convencional. Asimismo, subrayan que el porcentaje de incorporación del cerámico en el concreto preparado en obra no debe superar el 40%, ya que a medida que se incrementa el porcentaje de RCD cerámico a la mezcla, la resistencia a la compresión tiende a disminuir, lo que podría comprometer el cumplimiento de la resistencia esperada al cabo de los 28 días.

Ahora bien, si se incorporara esta alternativa a la tercera etapa del proyecto del estudio de caso se presentaría el siguiente escenario de la Tabla 55:

Actividad	Und	Cant	20% Rb (m <sup>3</sup> )	Agregado 3/4" (m <sup>3</sup> )	Arena (m <sup>3</sup> )	Cemento (Kg)	Agua (Lt)
Andenes	m3	596.6	100.23	400.92	334.10	208,810	107,388
Huellas	m3	256.76	43.14	172.54	143.79	89,866	46,217
<b>Subtotales</b>			<b>143.36</b>	<b>573.46</b>	<b>477.88</b>	<b>298,676</b>	<b>153,605</b>

*Tabla 55. Volumen de Rb aprovechado en la tercera etapa*

Según los datos presentados en la Tabla 55, la incorporación de esta alternativa permitiría aprovechar 143.36 m<sup>3</sup> de residuos cerámicos (Rb), equivalentes a 104 toneladas, considerando el peso unitario del residuo cerámico señalado en la Tabla 18. Este volumen de aprovechamiento representaría aproximadamente el 5.5% del peso total de los residuos generados, teniendo en cuenta que en la segunda etapa del proyecto se produjo 1,887.9 toneladas de residuos.

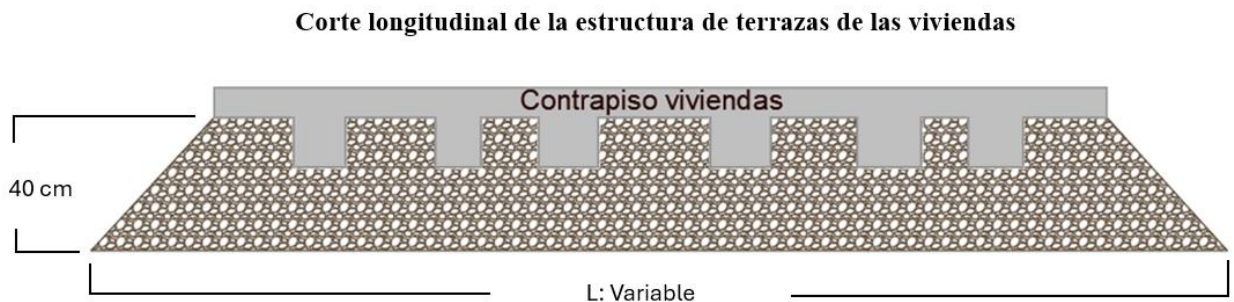
Sin embargo, es evidente que el aprovechamiento del RCD exclusivamente para la preparación de concretos no estructurales de 21 MPa con una incorporación del 20% de Rb no resulta suficiente para alcanzar la meta establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que exige el aprovechamiento del 30% de los residuos generados. Por lo tanto, es necesario implementar estrategias adicionales que permitan aprovechar, como mínimo, el 24.5% restante de los residuos, a fin de cumplir con los objetivos de sostenibilidad y gestión responsable de los RCD.

#### **b. Sustitución del 20% de material granular por residuo cerámico**

Tras el análisis detallado de las alternativas de aprovechamiento de RCD y considerando los residuos predominantes en el proyecto, se identificó que los residuos cerámicos (Rb) representan el 25.1% del total de residuos generados en la segunda etapa del macroproyecto. Este porcentaje proviene directamente de la zona de corte de mampostería, lo que significa que se trata de material libre de contaminación, almacenado en sitios exclusivos para este tipo de residuo. En función de esta caracterización, se seleccionó la estrategia de aprovechamiento que mejor se alinea con las características del proyecto y las capacidades de la empresa constructora.

El macroproyecto se compone de agrupaciones de viviendas en pachas de 8 unidades, formando terrazas de aproximadamente 48 viviendas cada una. Según el estudio de suelos, la cimentación de estas viviendas debe estar apoyada sobre una capa de mejoramiento con un espesor de 40 cm, la cual debe cumplir con parámetros granulométricos específicos para garantizar su estabilidad y capacidad de soporte. Actualmente, el material utilizado en el proyecto es la roca muerta, debido a sus propiedades mecánicas favorables, entre las que destacan:

- Ausencia de plasticidad, lo que evita problemas de expansividad.
- Excelente capacidad de drenaje, minimizando el riesgo de acumulación de humedad.
- Humedad óptima de compactación del 12.86%.
- Clasificación como grava mal gradada (GP), con predominio de partículas gruesas.



*Figura 26. Estructura de terrazas de las viviendas*

Como se visualiza en la Figura 26, las vigas de cimentación se apoyan directamente sobre la capa de 40 cm de roca muerta, lo que mejora la capacidad portante del suelo y garantiza la estabilidad a la estructura.

El análisis de alternativas permitió identificar que la combinación del residuo cerámico con la subbase mejora significativamente sus propiedades mecánicas. Estudios previos han demostrado que esta mezcla aumenta la capacidad portante, mejora la densidad del material y reduce su contenido de humedad. Para obtener estos resultados óptimos, se identificó que:

- La proporción de Rb en la mezcla debe estar entre el 20% y 30% del volumen total.

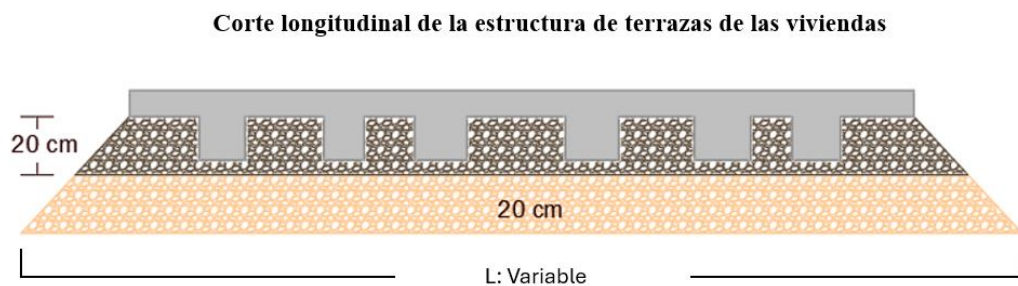
- El tamaño nominal del residuo cerámico no debe ser superior a  $\frac{3}{4}$ ", para asegurar una buena compactación y reducción de vacíos, lo que evita la saturación del material.

Si bien los estudios analizados se enfocan en la combinación de Rb con la subbase, en el caso del macroproyecto se está trabajando con roca muerta. Aunque podrían existir variaciones en los resultados, al analizar las propiedades granulométricas de ambos materiales, se identifican similitudes que justifican la aplicación de esta estrategia. No obstante, antes de su implementación, será necesario realizar pruebas de laboratorio con la roca muerta utilizada en el proyecto para verificar la viabilidad técnica y realizar los ajustes correspondientes.

Ahora bien, la propuesta consiste en modificar la estructura de la terraza de la siguiente manera:

- Primera capa de 20 cm: Mezcla con 20% de residuo cerámico (Rb) y 80% de roca muerta.
- Segunda capa de 20 cm: 100% roca muerta, garantizando mayor compactación en la capa superior y mejor capacidad de soporte.

Este esquema presentado en la Figura 27, sigue los principios fundamentales de estructuración de capas en ingeniería de suelos, asegurando que la capa superior tenga una mayor compactación para soportar las cargas estructurales de manera eficiente.



*Figura 27. Estructura de terrazas con la incorporación del Rb*

Actualmente, para la construcción de 524 unidades de vivienda se requiere un volumen de 9,596.79 m<sup>3</sup> de roca muerta. Con la estrategia de aprovechamiento propuesta, se obtiene la información presentada en la Tabla 56:

<b>Escenario</b>	<b>Roca muerta m<sup>3</sup></b>	<b>Rb m<sup>3</sup></b>
Actual	9,596.79	0
Nueva propuesta	8,637.11	959.68

*Tabla 56. Volumen de Rb requerido para el aprovechamiento*

Según la Tabla 44, la estrategia requiere 959.68 m<sup>3</sup> de residuo cerámico (Rb) para el ajuste en la estructura de las terrazas de viviendas del sector. No obstante, al revisar los datos obtenidos en el Capítulo 4, se identificó que el volumen de residuo cerámico proveniente de la zona de corte es de 653.7 m<sup>3</sup>, lo que representa solo el 25.1% del total de RCD generados. Esto evidencia la necesidad de implementar estrategias de separación en la fuente, permitiendo recuperar el residuo cerámico que actualmente se encuentra dentro de la categoría de residuos combinados (65.3%, equivalentes a 1,462.78 m<sup>3</sup>).

Si únicamente se realizará el aprovechamiento con el residuo proveniente de la zona de corte, es decir, los 653.7 m<sup>3</sup> se tendría el siguiente panorama expuesto en la Tabla 57:

<b>Descripción</b>	<b>Rb Ton</b>	<b>Rc Ton</b>	<b>Rc+Rb+Otros Ton</b>	<b>Peso Total Ton</b>	<b>%</b>
<b>Residuos generados</b>	477.18	181.34	1,228.74	1,887.26	100%
<b>Residuos reutilizados</b>	477.18	0	0	477.18	25.28%

*Tabla 57. Porcentaje proyectado de aprovechamiento de RCD*

El aprovechamiento alcanzado sería del 25.28% del total de RCD generados, quedando ligeramente por debajo del meta del 30% establecido en la Resolución 1257 de 2021 del MADS. Sin embargo, con la implementación de estrategias de segregación en la fuente, se puede recuperar un mayor volumen de residuo cerámico, lo que permitiría no solo alcanzar la meta de aprovechamiento, sino incluso superarla, maximizando los beneficios ambientales del proyecto.

## ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

### 5.1 Jornada de capacitación al equipo de obra

Actividad	<i>Jornada de capacitación: que es el RCD, cuáles son los tipos, ¿cómo separar?</i>				
Unidad	<i>Unidad</i>				
Item	Insumo	Unidad	Cant	Vr Unit	Vr Total
1.1	Capacitador sobre la gestión de RCD	Hr	3	\$ 80,000	\$ 240,000
1.2	Material impreso (manuales, guías)	Und	100	\$ 2,500	\$ 250,000
1.3	Refrigerio	Und	100	\$ 5,000	\$ 500,000
<b>Subtotal :</b>					<b>\$ 990,000</b>

### 5.2 Jornada de capacitación a la empresa constructora

Actividad	<i>Jornada de capacitación: Beneficios económicos y ambientales</i>				
Unidad	<i>Unidad</i>				
Item	Insumo	Unidad	Cant	Vr Unit	Vr Total
1.1	Capacitador sobre la gestión de RCD	Hr	2	\$ 120,000	\$ 240,000
1.2	Material impreso (manuales, guías)	Und	10	\$ 2,500	\$ 25,000
1.3	Refrigerio	Und	10	\$ 5,000	\$ 50,000
<b>Subtotal :</b>					<b>\$ 315,000</b>

### 5.3 Adecuación sitio de almacenamiento temporal

<b>Actividad</b>	<i>Adecuación del sitio de almacenamiento temporal</i>					
<b>Unidad</b>	<i>m2</i>					
<b>Item</b>	<b>Insumo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant</b>	<b>Rend</b>	<b>Vr Unit</b>	<b>Vr Total</b>
1.1	Piedra rajón	m3	0.05	3%	\$ 82,450	\$ 4,246
1.2	Guadua de 8 mts Cuartón de otopo	Und	0.7	2%	\$ 9,000	\$ 6,426
1.3	2x4x3m	Und	0.6	2%	\$ 14,280	\$ 8,739
1.4	Puntillas	Lb	0.5	5%	\$ 4,046	\$ 2,124
1.5	Teja de zinc	Und	0.6	2%	\$ 23,500	\$ 14,382
1.6	Lámina de zinc	Und	1		\$ 23,800	\$ 23,800
1.7	Alambre	Kg	0.3		\$ 6,033	\$ 1,810
1.8	Ayudantes	Jor	0.15		\$ 85,000	\$ 12,750
1.9	Minicargador	Hr	0.15		\$ 95,200	\$ 14,280
					<b>Subtotal : \$</b>	<b>88,558</b>

### 5.4 Adecuación sitio de almacenamiento de residuos

<b>Actividad</b>	<i>Adecuación del sitio de almacenamiento de residuos</i>					
<b>Unidad</b>	<i>m2</i>					
<b>Item</b>	<b>Insumo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant</b>	<b>Rend</b>	<b>Vr Unit</b>	<b>Vr Total</b>
1.1	Piedra rajón	m3	0.05	3%	\$ 82,450	\$ 4,246
1.2	Tela verde para cerramiento	Ml	2	5%	\$ 1,488	\$ 3,125
1.3	Guadua de 8 mts	Und	0.6		\$ 9,000	\$ 5,400
1.4	Cuartón de otopo 2x4x3m	Und	0.4	1%	\$ 14,280	\$ 5,769
1.5	Puntillas	Lb	0.5	2%	\$ 4,046	\$ 2,063
1.6	Alambre	Kg	0.3		\$ 6,033	\$ 1,810
1.7	Ayudantes	Jor	0.2		\$ 85,000	\$ 17,000
1.8	Minicargador	Hr	0.2		\$ 95,200	\$ 19,040
					<b>Subtotal : \$</b>	<b>58,454</b>

5.5 Alquiler maquinaria amarilla para transporte interno y cargue de residuos

Actividad	<i>Alquiler de maquinaria amarilla para cargue de residuos</i>					
Unidad	<i>M<sup>3</sup></i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant	Rend	Vr Unit	Vr Total
1.1	Retroexcavadora de llantas	Hr		0.1333	\$ 180,000	\$ 23,994
1.2						\$ -
1.3						\$ -
					<b>Subtotal :</b>	<b>\$ 23,994</b>

5.6 Supervisores de gestión de RCD

Actividad	<i>Supervisor de gestión de RCD en obra</i>					
Unidad	<i>Mes</i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant		Vr Unit	Vr Total
1.1	Supervisor de RCD	Mes	1	\$	1,500,000	\$ 1,500,000
1.2	Auxilio de transporte	Mes	1	\$	-	\$ -
1.3	Caja de compensación	Mes	1	\$	60,000	\$ 60,000
1.4	Seguridad social	Mes	1	\$	284,400	\$ 284,400
1.5	Vacaciones	Mes	1	\$	125,000	\$ 125,000
1.6	Primas	Mes	1	\$	125,000	\$ 125,000
1.7	Cesantías	Mes	1	\$	125,000	\$ 125,000
1.8	Interés sobre las cesantías	Mes	1	\$	15,000	\$ 15,000
1.9						\$ -
					<b>Subtotal :</b>	<b>\$ 2,234,400</b>

5.7 Alquiler de vibrocompactador

Actividad	<i>Alquiler de maquinaria amarilla para compactación de Rb</i>					
Unidad	<i>M³</i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant	Rend	Vr Unit	Vr Total
1.1	Rodillo vibrocompactador	Hr		0.1333	\$ 180,000	\$ 23,994
1.2						\$ -
1.3						\$ -
<b>Subtotal :</b>						<b>\$ 23,994</b>

5.8 Transporte de residuo cerámico hacia el sitio de almacenamiento

Actividad	<i>Transporte interno de residuo cerámico hacia el SAR</i>					
Unidad	<i>M³</i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant	Rend	Vr Unit	Vr Total
1.1	Minicargador	Hr		0.05	\$ 95,200	\$ 4,327
1.2						\$ -
1.3						\$ -
<b>Subtotal :</b>						<b>\$ 4,327</b>

5.9 Trituración del residuo

Actividad	<i>Trituración del residuo cerámico</i>					
Unidad	<i>M³</i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant	Rend	Vr Unit	Vr Total
1.1	Vibrocompactador	Hr		0.02	\$ 180,000	\$ 4,286
1.2						\$ -
1.3						\$ -
<b>Subtotal :</b>						<b>\$ 4,286</b>

5.10 Proceso de mezcla 80%-20%

Actividad	<i>Proceso de mezcla 80% - 20%</i>					
Unidad	<i>M³</i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant	Rend	Vr Unit	Vr Total
1.1	Residuo cerámico	m³	1		\$ -	\$ -
1.2	retrocargador Instalación del 80% RC	Hr		0.02	\$ 180,000	\$ 2,727
1.3	+20% Rb	m³	1		\$ 29,571	\$ 29,571
					<b>Subtotal :</b>	<b>\$ 32,298</b>

5.11 Suministro e instalación roca muerta

Actividad	<i>Suministro e instalación de roca muerta</i>					
Unidad	<i>M³</i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant		Vr Unit	Vr Total
1.1	Suministro roca muerta	m³	1		\$ 40,271	\$ 40,271
1.2	Transporte de roca muerta	m³	1		\$ 1,309	\$ 1,309
1.3	Instalación roca muerta	m³	1		\$ 27,537	\$ 27,537
					<b>Subtotal :</b>	<b>\$ 69,117</b>

5.12 Estudio de suelos

Actividad	<i>Estudio de suelos</i>					
Unidad	<i>Und</i>					
Item	Insumo	Unidad	Cant		Vr Unit	Vr Total
1.1	Granulometría		1		\$ 250,000	\$ 250,000
1.2	Límites de Atterberg		1		\$ 180,000	\$ 180,000
1.3	Densidad de partículas		1		\$ 270,000	\$ 270,000
1.4	Proctor estándar o modificado		1		\$ 400,000	\$ 400,000
1.5	CBR		1		\$ 400,000	\$ 400,000
1.6	Permeabilidad carga constante		1		\$ 1,000,000	\$ 1,000,000
1.7	Permeabilidad carga variable		1		\$ 1,000,000	\$ 1,000,000
1.8	Triaxial CU o CD		1		\$ 1,500,000	\$ 1,500,000
					<b>Subtotal :</b>	<b>\$ 5,000,000</b>