

**Metodologías de gestión de residuos sólidos de construcción (GRCD) innovadoras y
eficientes ajustadas al Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB)**

Juan Sebastián Amaya Toloza

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Luis Carlos Tiria Sandoval

Magíster en Gestión y Evaluación de Proyectos de Inversión

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2025

Contenido

Introducción.....	17
1. Metodologías de gestión de residuos sólidos de construcción (GRCD) innovadoras y eficientes ajustadas al Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB)	19
1.1 Planteamiento del problema.....	19
1.2 Justificación	22
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Objetivo general.....	25
1.3.2 Objetivos específicos	25
2. Marco referencial.....	26
2.1 Marco teórico	26
2.1.1 Importancia de la gestión eficiente de los RCD	26
2.1.2 La gestión de RCD y su contribución a la sostenibilidad y la economía circular a nivel global.....	26
2.2 Marco legal	27
2.2.1 Artículos 79 y 80 - Constitución Política de Colombia	27
2.2.2 Resolución 0472 de 2017	27
2.2.3 Resolución 2412 de 2018	27
2.2.4 Ley 1259 de 2008.....	28
2.2.5 Decreto 1713 de 2002	28
2.2.6 Resolución 1257 de 2021	28
2.2.7 Decreto 1076 de 2015	28
3. Estado del Arte	29
3.1 Introducción estado del arte	29

3.2 Investigaciones (Antecedentes)	29
3.2.1 «Plan de gestión integral de residuos sólidos - PGIRS 2016 – 2027», 2022	29
3.2.2. Cómo la gestión de RCD ha abordado los objetivos de desarrollo sostenible: Explorando las tendencias académicas e industriales	32
3.2.3 CODD: conjunto de datos de referencia clasificación automatizada de RCD.....	33
3.2.4. Diseño robusto para una red regional de logística inversa de RCD de varios niveles basada en la actitud conservadora de los responsables de la toma de decisiones	36
3.2.5 Detección de residuos de demolición de obras en tiempo real utilizando métodos de aprendizaje profundo de última generación; Detectores de una etapa frente a detectores de dos etapas	37
3.2.6 Disponibilidad y procesamiento de áridos reciclados dentro de la cadena de suministro de la construcción y la demolición: Una revisión	40
3.2.7 Uso de áridos reciclados procedentes de RCD en nuevas construcciones.....	41
3.2.8 Análisis de la GRCD del sector residencial en el AMB principio de las 3R.....	43
4. Metodología.....	44
5. Desarrollo	46
5.1 Revisión de planes administrativos de GRCD en otros países adaptables al AMB ...	46
5.1.1 Gestión actual de RCD en el AMB (Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta).....	46
5.2 Análisis de métodos innovadores más recientes para la GRCD, implementados o en fase avanzada de estudio en otros países	79
5.2.1 Método preventivo en la generación de RCD mediante la extensión de la vida útil en edificaciones de Dinamarca, Alemania, Reino Unido, Finlandia y Alemania.....	79
5.2.2 Método BIM-CDW Info Model: Aplicación en la GRCD en Brasil y Portugal..	84

5.2.3 Método para la mejora de la GRCD en China basado en las 3R	88
5.2.4 Método químio-métrico y espectroscópico para la caracterización, cuantificación y GRCD en materiales cerámicos mediante XRF, DRX, SWIR en ESPAÑA	92
5.2.5 Investigación aplicaciones de robótica GRCD a nivel global Chipre	96
6. Resultados e impacto	100
6.1 Datos recopilados a partir de la muestra	100
6.2 Identificación de desafíos en la GRCD en el AMB	101
6.2.2 Deficiencias en la implementación de normativas y trámites administrativos en la GRCD en el AMB	106
6.2.3 Impactos económicos	107
6.2.4 Impactos sociales	107
6.2.5 Impactos ambientales	107
6.3 Acciones viables para la GRCD en el AMB	109
6.3.1 Hallazgos relevantes	110
6.3.2 Hallazgos importantes	112
7. Conclusiones	114
8. Recomendaciones	116
Referencias	118
Apéndices	127

Lista de figuras

Figura 1. <i>Árbol de problemas gestión RCD en el AMB</i>	22
Figura 2. <i>Tabla II-21 Gestión de RCD</i>	30
Figura 3. <i>Tabla objetivos y metas planteados en el PGIRS.</i>	31
Figura 4. <i>Tabla programa de gestión de RCD según su priorización de problemas</i>	32
Figura 5. <i>Tabla visiones temáticas emergentes que abordan los ODS en la literatura académica</i>	33
Figura 6. <i>Un ejemplo ilustrativo de objetos anotados en el conjunto de datos que muestra la utilización de cuadros delimitadores (izquierda) y máscaras de segmentación de instancias generadas por SAM (derecha)</i>	34
Figura 7. <i>Se han detectado cuadros delimitadores YOLOV8x-seg (640 × 640) y máscaras de segmentación de instancias en imágenes de conjuntos de pruebas seleccionados.</i>	35
Figura 8. <i>Estructura de la red regional de logística</i>	37
Figura 9. <i>Resultados de inferencia en imágenes que contienen muestras desequilibradas de clase (extraídas de set_1 de prueba).</i>	38
Figura 10. <i>Brazos robóticos seleccionando muestras, tomado de video del estudio</i>	39
Figura 11. <i>Muestras separadas de RCD: separación realizada por brazos robóticos sistematizados</i>	39
Figura 12. <i>Composición de RCD</i>	41
Figura 13. <i>Clases de Exposición Ambiental</i>	42
Figura 14. <i>Resultados de las pruebas de RAC y NAC utilizadas para el Parque de Humedales de Hong Kong</i>	43
Figura 15. <i>Desarrollo metodológico propuesto</i>	45
Figura 16. <i>Generación de RCD en el AMB.</i>	50

Figura 17. <i>Tendencia de disminución de la generación mensual de RCD en el AMB.....</i>	52
Figura 18. <i>Roles y responsabilidades generales-Módulo RCD/Materiales–Construcción.</i>	56
Figura 19. <i>Gobernanza en Obra - Módulo RCD/Materiales – construcción.....</i>	57
Figura 20. <i>Planta móvil para el reciclaje de RCD.....</i>	58
Figura 21. <i>Cadena de Valor de RCD pétreos y residuos de excavación.....</i>	58
Figura 22. <i>Prefabricados de concreto integrando RCD reciclados.....</i>	58
Figura 23. <i>Bloques de tierra prensada estabilizados con cemento.....</i>	59
Figura 24. <i>Cerro de la Cantera – Ciudadela Barrio Blanco – exhibición de Material Durante el Foro Constructor 2019.....</i>	60
Figura 25. <i>Intensidad Material en kg/m2 para un edificio residencial tipo en el AMB, por tipo de residuo.....</i>	61
Figura 26. <i>Proceso de elaboración y reporte en aplicativo web del PD-RCD.....</i>	63
Figura 27. <i>Beneficios Cemex - parque minero-industrial El Tunjuelo.....</i>	63
Figura 28. <i>Productos primarios a partir de RCD.....</i>	64
Figura 29. <i>Planta de trituración. Tunjuelo-Cemex.....</i>	64
Figura 30. <i>Plan de ensayo desarrollado por Cemex Colombia.....</i>	65
Figura 31. <i>Planta de RCD Greco S.A.S.....</i>	67
Figura 32. <i>Planta de trituración GRECO (Cota- Cundinamarca).....</i>	67
Figura 33. <i>Comparación de la generación de RCD por PIB del sector de la construcción en diferentes regiones del mundo.....</i>	72
Figura 34. <i>Relación entre el análisis FODA y la matriz TOWS. La interacción entre las estrategias SO, WO, ST y WT en la matriz TOWS refleja impactos de mejora recíprocos. Estos pueden aprovecharse a partir de las siete estrategias propuestas en el cuadrante central.....</i>	73

Figura 35. <i>Impacto económico del reciclaje de RCD en Corea del Sur, Dhaka y USA</i>	74
Figura 36. <i>Estrategias para mejorar el reciclaje de RCD en Dhaka (Bangladesh)</i>	74
Figura 37. <i>Barreras y contramedidas de los CDWRE.</i>	75
Figura 38. <i>Mapa visual de los artículos más citados en los estudios sobre GRCD.</i>	76
Figura 39. <i>Evolución de las Publicaciones sobre GRCD (2013-2022).</i>	77
Figura 40. <i>Citas totales por país: Australia, China y Hong Kong.</i>	78
Figura 41. <i>Publicaciones por país: Australia, China y Hong Kong.</i>	78
Figura 42. <i>Impacto y conectividad global en la investigación sobre RCD.</i>	79
Figura 43. <i>Vista sección transversal: propuesta de remodelación de Gröninger Höf Parkhaus.</i>	82
Figura 44. <i>TDA Hamburgo, 2024.</i>	82
Figura 45. <i>Proporción de ahorros en materiales, residuos y emisiones de CO₂.</i>	83
Figura 46. <i>Comparación de costos entre intervención circular y construcción nueva.</i>	83
Figura 47. <i>Pasos del modelo conceptual para la GRCD basado en BIM.</i>	84
Figura 48. <i>Indicadores RCD para el modelo de información BIM-CDW.</i>	86
Figura 49. <i>Tipos de información y formatos de archivos en la GRCD mediante BIM.</i>	87
Figura 50. <i>Porcentaje de residuos generados en el edificio por tipo de material.</i>	88
Figura 51. <i>Estrategias para superar los obstáculos en la GRCD.</i>	89
Figura 52. <i>Distribución de entrevistados por profesión en la GRCD en China.</i>	92
Figura 53. <i>a) Absorbancia SWIR en bruto, b) Espectros Raman de la muestra real de RCD en las mismas condiciones que los modelos, c) Predicción del contenido de ladrillo y hormigón en la muestra desconocida de RCD mediante espectroscopia SWIR, Raman y XRF, con error estimado (%)</i>	93

Figura 54. Estadísticas numéricas positivas extraídas del artículo de Marín-Cortés et al. (2023), <i>Chemometric-driven quantification of construction and demolition waste using Raman spectroscopy and SWIR</i>	94
Figura 55. Precisión en la identificación de los RCD obtenidos mediante diferentes métodos (SWIR, Raman, y XRF) tomados de Marín-Cortés et al. (2023), <i>Cuantificación química métrica de RCD mediante espectroscopia Raman y SWIR</i>	95
Figura 56. Potencial de aplicación futura de la espectroscopia Raman en el reciclaje de RCD.....	95
Figura 57. Beneficios de la espectroscopia Raman en la clasificación de RCD.....	96
Figura 58. Rendimiento del modelo YOLOV8X en la segmentación de cuadros delimitadores e instancias por clase de objeto en (a) el conjunto de validación y (b) el conjunto de prueba.....	97
Figura 59. Cuadros delimitadores YOLOV8x-seg (640× 640) y máscaras de segmentación de instancias detectadas en imágenes de prueba seleccionadas.....	98
Figura 60. Arquitectura del detector de objetos de una y dos etapas (Bochkovskiy et al., 2020).....	99
Figura 61. (a) Fotografía y (b) Ilustración esquemática del prototipo de estación de clasificación de RCD compuesto por (A) una cámara RGB, (B) un brazo manipulador robotizado y (C) una cinta transportadora.....	99
Figura 62. Generación Anual de RCD por Región (Toneladas).....	102
Figura 63. Distancia y tiempo de viaje a Proyectos e Inversiones El Parque S.A Antes Botadero Tierra El Parque SAS desde el centro de los municipios del AMB.....	102
Figura 64. Evaluación de las deficiencias en la GRCD en el AMB.....	104
Figura 65. Demanda mundial de áridos (Toneladas/Año).....	108

<i>Figura 66. Cuadro de evaluación del desempeño de los productos del proyecto.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 67. Cuadro de impacto del proyecto en diferentes aspectos.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 68. Importancia de la gestión eficiente de RCD en el AMB.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 69. Acciones viables para mitigar los desafíos encontrados en la GRCD en el AMB (primera parte).</i>	<i>113</i>
<i>Figura 70. Acciones viables para mitigar los desafíos encontrados en la GRCD en el AMB (segunda parte).....</i>	<i>114</i>

Lista de Apéndices

<i>Apéndice A. Utilizar mapas para extraer datos geográficos de demolición. (Paso 1 del método).....</i>	<i>127</i>
<i>Apéndice B. Utilizar un registro de edificios para analizar las pautas de sustitución. (Paso 2 del método).....</i>	<i>128</i>
<i>Apéndice C. Análisis de los factores de localización. (Paso 3 del método).....</i>	<i>129</i>
<i>Apéndice D. Analizar las perspectivas de las principales partes interesadas. (Paso 4 del método).....</i>	<i>130</i>
<i>Apéndice E. Entrevistas realizadas sobre la GRCD.....</i>	<i>131</i>
<i>Apéndice F. Mapa simplificado del proceso del modelo de información BIM-CDW.....</i>	<i>132</i>

Resumen

La gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) enfrenta desafíos en su eficiencia y aprovechamiento, lo que genera impactos ambientales y limita la adopción de prácticas sostenibles en el sector. Se pretende realizar un análisis del modelo actual de gestión de RCD en el AMB y contrastarlo con enfoques innovadores implementados en otros países, con el fin de proponer estrategias que optimicen su aprovechamiento. Para esto se empleó una metodología de investigación mixta, combinando análisis cualitativo y cuantitativo a partir de revisión documental, entrevistas a actores clave y procesamiento de datos en Excel y Tableau. Donde se logró identificar deficiencias en la regulación, baja participación de gestores y limitaciones en la reincorporación de agregados reciclados (AR) en la construcción. Además, se analizaron modelos internacionales que han demostrado mayor eficiencia en la reducción y valorización de los RCD. Con respecto a los hallazgos obtenidos, se propone un modelo de gestión integral que complemente el sistema actual, con estrategias orientadas a la reducción de generación de RCD, el fortalecimiento de gestores y la promoción del uso de AR, garantizando su viabilidad dentro del contexto local.

Palabras clave: gestión de RCD, sostenibilidad, agregados reciclados, modelo de gestión, construcción

Abstract

The management of construction and demolition waste (CDW) in the Metropolitan Area of Bucaramanga (AMB) faces challenges in its efficiency and use, which generates environmental impacts and limits the adoption of sustainable practices in the sector. The aim is to analyze the current model of CDW management in the AMB and contrast it with innovative approaches implemented in other countries, in order to propose strategies to optimize its use. For this purpose, a mixed research methodology was used, combining qualitative and quantitative analysis based on documentary review, interviews with key actors and data processing in Excel and Tableau. It was possible to identify deficiencies in regulation, low participation of managers and limitations in the reincorporation of recycled aggregates (RA) in construction. In addition, international models that have demonstrated greater efficiency in the reduction and valorization of CDW were analyzed. With respect to the findings obtained, a comprehensive management model is proposed to complement the current system, with strategies aimed at reducing the generation of CDW, strengthening managers and promoting the use of RA, guaranteeing its viability within the local context.

Key words: CDW management, sustainability, recycled aggregates, management model, construction.

Glosario

Este glosario fue elaborado con términos encontrados en la Resolución 1257 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021[32]

Almacenamiento: es la ubicación temporal de los RCD en recipientes, contenedores, sitios de acopio temporal y/o depósitos para su recolección y transporte con fines de aprovechamiento o disposición final.

Aprovechamiento de RCD: la capacidad de utilizar de manera efectiva los materiales reciclados a partir de los RCD en diversas aplicaciones.

Certificaciones gestor RCD: acreditaciones o reconocimientos que demuestran que las empresas gestoras de RCD cumplen con estándares y requisitos específicos de calidad y sostenibilidad.

Control de calidad: la supervisión y verificación rigurosa de los materiales reciclados para garantizar que cumplan con los estándares de calidad requeridos para su uso en la construcción.

Demolición selectiva: un enfoque que implica la separación de materiales en el lugar de origen durante la demolición para identificar elementos reciclables y reducir la contaminación.

Desarrollo sostenible: un enfoque global que busca equilibrar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente y la promoción del bienestar social a largo plazo.

Disposición final: la etapa en la que los RCD que no pueden ser reciclados o reutilizados se destinan a rellenos sanitarios u otras formas de disposición segura.

Empresas gestoras de RCD: son aquellas organizaciones responsables de la recolección, procesamiento y GRCD en una determinada región.

Estrategias de gestión: las acciones y enfoques empleados para manejar y optimizar el tratamiento de los RCD, incluyendo la reutilización, reciclaje y reducción de estos residuos.

Gran generador de RCD: es el generador de RCD que cumple con alguna de las siguientes condiciones: 1) requiere la expedición de licencia de construcción en cualquiera de sus modalidades y/o licencia de intervención y ocupación del espacio 2) los proyectos que requieran licencias ambientales. En ambos casos, las obras deberán tener un área construida igual o superior a 2000 m².

Gestión de residuos de construcción y demolición (GRCD): el proceso de planificar, organizar y controlar la recolección, transporte, tratamiento y disposición de los RCD de manera eficiente y sostenible.

Gestión integral: un sistema completo que abarca desde la demolición hasta la reutilización de RCD, maximizando su uso en proyectos de construcción.

Normativas y regulaciones: leyes y normas específicas, como la Resolución 1257 de 2021 y la norma técnica colombiana NTC 5373, que regulan la gestión de los RCD en Colombia.

Plantas de aprovechamiento: instalaciones en las cuales se procesan y clasifican los RCD para su reutilización en nuevas aplicaciones.

Plantas de reciclaje: instalaciones equipadas con maquinaria especializada para el procesamiento y clasificación de materiales reciclables a partir de los RCD.

Receptor: persona natural o jurídica que, aunque no se dedica principalmente a la gestión de RCD, los utiliza como materia prima en su proceso productivo mediante simbiosis industrial, en proyectos u obras propias o ajenas, cumpliendo con las condiciones de esta resolución.

Residuos RCD: materiales residuales generados después de la demolición y construcción de estructuras, que incluyen hormigón, madera, metal, ladrillos y otros.

Sectorización: aplicación de los RCD reciclados en actividades como la construcción de carreteras, rellenos en zonas mineras y otros proyectos de construcción.

Simbiosis industrial: estrategia colaborativa para intercambiar flujos físicos de materiales, energía o agua y compartir servicios entre actores, promoviendo el uso eficiente de recursos y la reducción de impactos ambientales.

Minería urbana: significa recuperar y reutilizar los materiales de construcción de las ciudades.

Abreviaturas – siglas de uso común

AMB - Área metropolitana de Bucaramanga

AR - Agregados reciclados

CDMB - Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

GRCD - Gestión de residuos sólidos de construcción y demolición

IA - Inteligencia artificial

ODS - Objetivos de desarrollo sostenible

PDM - Plan de desarrollo municipal

POT – Plan de ordenamiento territorial

RCD - Residuos de construcción y demolición

Introducción

Para comenzar actualmente la gestión de los residuos de construcción y demolición (GRCD) en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) enfrenta importantes desafíos, como la escasez de gestores certificados, la falta de infraestructura adecuada y la ausencia de incentivos económicos ya que una gran cantidad de RCD terminan siendo depositados en escombreras o sitios no autorizados, generando impactos ambientales y costos adicionales para su disposición. Para esta gestión hay varias normativas estipuladas, como la Resolución 1257 de 2021[32], la cual es muy detallada y completa, en el momento de su implementación enfrenta deficiencias, obstaculizando el aprovechamiento eficiente de los RCD.

Además, a nivel internacional, países como Australia, China y la Unión Europea han implementado estrategias innovadoras y eficientes para mejorar la GRCD, incluyendo el uso de agregados reciclados (AR) de alta calidad, tecnologías de modelado digital (BIM) y economía circular aplicada a la construcción. En el AMB, los estudios realizados por Swiss Contact & Embassy of Switzerland in Colombia, 2019 [43] han evidenciado la necesidad de adaptar estos métodos al contexto local, especialmente para mitigar la disposición inadecuada de RCD y fomentar su reutilización en nuevos proyectos constructivos.

El objetivo de esta investigación es analizar la gestión actual de los RCD en el AMB y compararla con modelos innovadores y eficientes implementados o en fase avanzada de estudio en otros países. A partir de este análisis, se busca proponer estrategias que optimicen el aprovechamiento de los RCD. Para ello, se emplea un enfoque cualitativo y cuantitativo, con el fin de identificar acciones viables que contribuyan a reducir la generación de estos residuos, aumentar el número de gestores y fomentar el uso de AR en el sector de la construcción. Todo esto mediante un modelo de gestión integral que complemente y optimice el sistema actualmente en funcionamiento en el AMB, brindándole mayor viabilidad.

Además, en el ámbito ambiental una inadecuada gestión de los RCD genera impactos negativos en el medio ambiente, como la degradación del suelo y la contaminación de cuerpos hídricos. Mejorar su aprovechamiento reducirá la extracción de áridos naturales. Para el ámbito económico la reutilización de RCD puede disminuir costos de construcción y transporte, además de incentivar la creación de empresas gestoras, generando empleos en el sector. Ya para el sector social se prevé que nuevas estrategias de GRCD fortalecerá el cumplimiento normativo y mejorará la calidad de vida en el AMB, reduciendo puntos críticos de disposición ilegal.

Para la metodología de análisis mixto (cualitativo y cuantitativo) utilizada en esta investigación, se realiza una evaluación de la cantidad de RCD generados, disposición final y cobertura de gestores en el AMB, así como modelos metodológicos de GRCD que puedan ser implementados en la region para así proponer estrategias basadas en hallazgos previos para mejorar la GRCD en el AMB.

En resumen, se busca identificar las principales barreras en la GRCD en el AMB, realizar propuestas de soluciones aplicables al contexto local basadas en metodologías innovadoras y eficientes para luego realizar el análisis de la viabilidad del aprovechamiento de AR en el sector de la construcción.

Por consiguiente, esta investigación no busca cambiar radicalmente el modelo actual de GRCD, sino fortalecerlo y optimizarlo a través de estrategias viables que permitan un manejo más eficiente de los residuos. La investigación brindará herramientas para que entidades como la CDMB, las alcaldías y las empresas del sector constructivo puedan tener en cuenta para una mejora de su gestión de RCD, impulsando una transición hacia una economía circular más sostenible en el AMB.

1. Metodologías de gestión de residuos sólidos de construcción (GRCD) innovadoras y eficientes ajustadas al Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB)

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, el crecimiento acelerado de la población urbana a nivel mundial y en América Latina, particularmente en el AMB, plantea desafíos significativos en la GRCD. Se estima que para el año 2050, más del 56% de la población mundial residirá en ciudades [5] [36], y en el AMB se ha observado un aumento anual considerable en la población, alcanzando 1.240.794 habitantes en 2018 [12]. Este crecimiento, impulsado por el desarrollo económico y la demanda de infraestructura urbana, conlleva inevitablemente a una mayor generación de RCD, ya que la construcción de nuevas edificaciones a menudo requiere la demolición de estructuras antiguas, aumentando así el volumen de RCD. A pesar de la relevancia de la construcción como una fuente primaria de residuos, tanto en Colombia como a nivel global, existen serias deficiencias en los sistemas de recolección, disposición final y reutilización de estos materiales. Por ejemplo, en Europa, los RCD representan el 37,5% del total de residuos, superando incluso a sectores industriales que normalmente son más contaminantes [28]. Sin embargo, en Colombia, la infraestructura y los mercados para la gestión efectiva de RCD no están adecuadamente desarrollados [43].

Las entidades responsables de la gestión ambiental en el AMB, como la Subsecretaría del Medio Ambiente, la Secretaría de Planeación de Bucaramanga y la CDMB, enfrentan grandes retos. La falta de programas estructurados, normativas claras y la insuficiente infraestructura destinada a la gestión y disposición adecuada de RCD son obstáculos críticos [1] [40]. Además, la región carece de datos confiables sobre la generación, disposición y aprovechamiento de estos residuos, lo que perpetúa la disposición ilegal y la falta de

transparencia en el manejo de estos [43]. Desde 2015, el AMB ha experimentado una notable escasez de gestores de RCD, las cuales son entidades clave encargadas de la recolección, transporte, almacenamiento y disposición final de estos residuos según normativas como la resolución 1257 del 2021 [43] [38]. A pesar de algunos avances en el número de gestores registrados, que aumentaron de 9 en 2019 a 14 en 2020, las prácticas actuales frecuentemente no garantizan un manejo confiable de los residuos, con muchos de estos acabando en sitios de disposición final sin aprovechamiento significativo [43] [38]. En este contexto, Proyectos e Inversiones El Parque S.A Antes Botadero de Tierra El Parque S.A., principal sitio de disposición de RCD en el AMB, no ha logrado implementar proyectos eficaces de aprovechamiento de residuos, a diferencia de otros esfuerzos exitosos en la región [40].

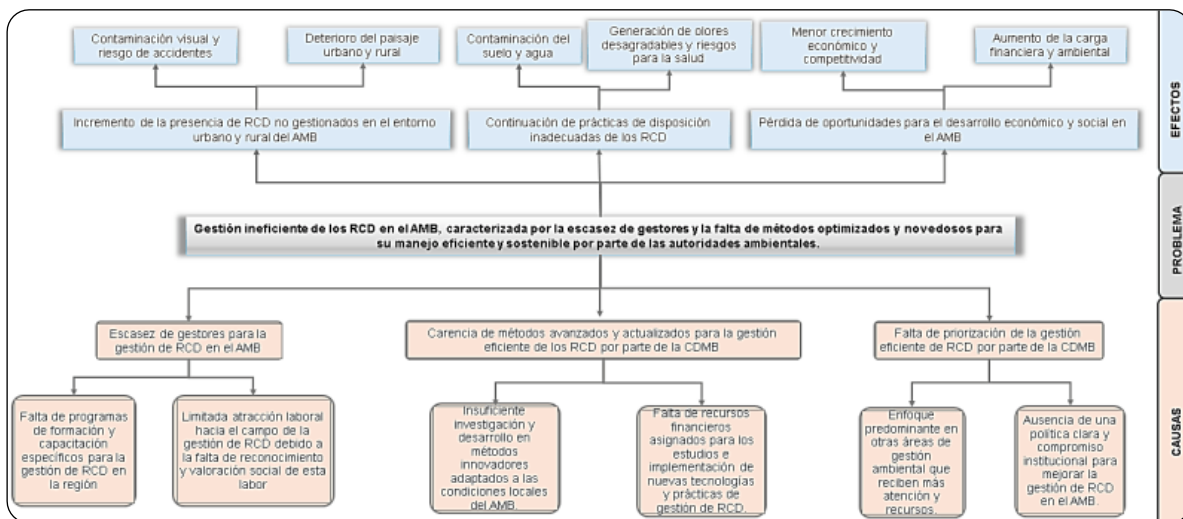
Este problema plantea la necesidad urgente de desarrollar estrategias efectivas y sostenibles para la gestión integral de RCD en el AMB, promoviendo prácticas que minimicen el impacto ambiental y maximicen la reutilización de materiales valiosos en el ciclo de vida urbano. En la actualidad, varias entidades, como el Clúster de Construcción de la Cámara de Comercio de Bucaramanga, han investigado la gestión de los RCD en la región. Sin embargo, estas investigaciones no abordan completamente la falta de gestores o estrategias adecuadas para gestionarlos. Un estudio realizado por la Embajada de Suiza en Colombia y la Cámara de Comercio de Bucaramanga resalta gran parte de estas problemáticas. Aunque se ha identificado un programa para implementar un nuevo material llamado ladrillo EC2S, capaz de competir con el ladrillo tradicional en el AMB, aún faltan estudios para consolidar este proyecto [43], especialmente en la producción de AR de alta calidad. Estos estudios deben investigar costos, métodos de obtención y beneficios por aportar a la cadena de valor de la construcción en Santander.

El problema radica en la falta de un ciclo eficiente para convertir los RCD en AR de alta calidad que puedan integrarse al mercado mediante economía circular. Desde la recolección inicial, se enfrentan dificultades debido a la escasez de gestores equipados con la infraestructura necesaria en todo el AMB, dado que las plantas de tratamiento de RCD no se encuentran ubicadas cerca, esto genera costos de transporte adicionales y disminuye la confiabilidad sobre su destino final. Además, persisten problemas metodológicos que afectan las buenas prácticas de reciclaje y aprovechamiento. Económicamente, no se ha adoptado tecnología suficiente para estos procesos, lo que compromete la rentabilidad en la producción de AR. Esta problemática afecta a la sociedad en general, así como a entidades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y las alcaldías del área metropolitana (Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta), y en particular a la CDMB, responsable del manejo adecuado de los RCD ante estos entes. Es esencial implementar estrategias efectivas para el aprovechamiento de los RCD, acompañadas de inversiones en infraestructura y capacitación para mejorar su gestión. Asimismo, se requiere revisar y fortalecer las políticas y regulaciones relacionadas con la gestión de residuos en la región, así como incrementar la investigación para desarrollar mejores métodos y prácticas en su manejo. Estos esfuerzos son fundamentales para la implementación de planes innovadores y efectivos que puedan abordar el problema actual.

El problema central es la gestión ineficiente de los RCD en el AMB, marcada por la ausencia de métodos optimizados y novedosos para el manejo de RCD que sean eficientes y sostenibles por parte de la CDMB, como se muestra en la Fig. 1. *Árbol de problemas gestión RCD en el AMB*. Esta gestión inadecuada provoca diversas causas que generan efectos negativos en distintos aspectos. En la parte inferior del árbol de problemas se detallan estas causas y sus factores desencadenantes, mientras que en la parte superior se exponen los

efectos y sus consecuencias. La pregunta problemática que surge es: ¿Cuáles son los principales desafíos en la gestión de los RCD en el AMB, considerando la escasez de gestores y la falta de métodos eficientes y sostenibles, y cómo afectan estos problemas los aspectos económicos, sociales y ambientales?

Figura 1. *Árbol de problemas gestión RCD en el AMB*



1.2 Justificación

Se pretende analizar la gestión integral de los RCD en el AMB, buscando métodos alternativos y novedosos para su aprovechamiento y gestión adecuada. Este aprovechamiento "es el proceso que comprende la reutilización en construcción, tratamiento y reciclaje de los RCD, con el fin de realizar su reincorporación al ciclo económico" [6]. Los métodos se enfocan desde el inicio del ciclo de gestión por parte del generador de RCD, pasando por las plantas de aprovechamiento. La gestión se sitúa en un programa de manejo ambiental de RCD, revisando programas de gestión exitosos en otros países que hayan logrado niveles avanzados en economía circular y sostenibilidad, añadiendo valor a la cadena del sector

constructivo. Se revisarán aspectos técnicos, ambientales, sociales y tecnológicos, considerando estudios de investigación, aplicaciones y modelos implementados, de acuerdo con las políticas y normativas vigentes en los países seleccionados, siguiendo la normativa colombiana dictada en la resolución 0472 del 2017 y su modificación, la resolución 1257 del 2021 [5].

La relevancia de esta investigación radica en la necesidad de abordar los desafíos actuales en la disposición final y aprovechamiento de los RCD en el AMB, utilizando estrategias de gestión innovadoras implementadas o en estudio avanzado en países desarrollados, como los de la Unión Europea, Asia, Norteamérica y Oceanía. En países como Australia, Hong Kong y Reino Unido, se han adoptado métodos avanzados para la gestión integral, el aprovechamiento y la reutilización en construcción de los RCD, logrando una reducción significativa en las cantidades y volúmenes de residuos generados gracias a los esfuerzos por tener una industria de la construcción "más verde" [8].

En Bucaramanga existe una falta de información sobre las prácticas actuales y las posibles alternativas para una gestión integral de los RCD [7]. Este vacío de conocimiento presenta una oportunidad para investigar y proponer soluciones que mejoren la gestión de estos residuos en el AMB, especialmente considerando las dificultades enfrentadas por la CDMB en la administración de Proyectos e Inversiones El Parque S.A. Antes Botadero Tierra al Parque S.A. El manejo inadecuado de estos materiales se debe a la escasez de gestores de RCD y la falta de infraestructura óptima, según lo descrito en la resolución 1257 de 2021, que establece criterios para la disposición final de RCD, incluyendo la oferta ambiental del sitio, degradación del suelo, distancia a cuerpos hídricos, capacidad del área, características geomorfológicas, disponibilidad de vías de acceso, densidad poblacional y uso del suelo [6].

A través del análisis de la cantidad de RCD generados, su disposición final y la identificación de métodos para su aprovechamiento, se busca evidenciar el alto porcentaje de materiales aprovechables que no están siendo utilizados adecuadamente en la región. Esta información ayudará a proponer soluciones acordes con nuevas tecnologías y enfoques administrativos para la gestión integral de los RCD en el AMB.

Es importante considerar las normativas vigentes en Colombia para el uso de materiales reciclados, como los AR, que se busca pertenezcan a los residuos pétreos (hormigón, arena, grava, gravillas, etc.). Por ejemplo, si se pretende utilizar estos materiales para la construcción de vías, se rige por la Resolución 1257 de 2021, que regula la GRCD, así como la normativa del Invías y el PDM [6]. Además, se requiere un documento de certificación que confirme que el productor de estos agregados reciclados está debidamente autorizado, verificando el origen, clasificación, procesamiento y control de producción de los residuos, mediante los formatos establecidos en la Resolución 0472 del 2017 [8] y su modificación, la Resolución 1257 del 2021 [6].

En conclusión, se pretende analizar las normativas actuales, evaluar los métodos más novedosos y tecnológicos para la gestión integral de los RCD, garantizando avances económicos, ambientales, sociales y de desarrollo urbano sostenible. Esta propuesta se alinea con la línea de investigación "Investigación e Innovación en Educación en Ingeniería" al proporcionar una oportunidad para el desarrollo de competencias de investigación, la aplicación práctica de conocimientos en contextos locales y globales, y la promoción de la innovación educativa en la gestión de los RCD.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar metodologías de gestión de residuos de construcción y demolición (GRCD) que sean innovadoras y eficientes, a través de un análisis mixto basado en avances de otros países para la realización de una sugerencia acorde a un modelo de gestión integral ajustado al Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB).

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las razones generadoras de la escasez de gestores de residuos sólidos de construcción en el AMB, definiendo acciones que sean viables para el aumento de gestores.
- Identificar los métodos actuales de administración en la GRCD en el AMB para contrastarlos con los métodos más recientes que estén siendo implementados o que estén en estudio avanzado en otros países, con un enfoque en el aprovechamiento de AR de alta calidad.
- Establecer la importancia de la gestión eficiente de RCD por parte de las entidades responsables para que se demuestre la estimación de beneficios económicos, ambientales y sociales del AMB.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Importancia de la gestión eficiente de los RCD

Gestionar las enormes cantidades de RCD generados por la industria de la construcción a nivel mundial representa un desafío significativo. Según estadísticas de diversos países desarrollados, avanzados en tecnología y economía, como ejemplo está Estados Unidos, en donde se producen anualmente 170 millones de toneladas de RCD [9]. En Australia, se generan 19 millones de toneladas al año, de las cuales 8,5 millones son depositadas en vertederos y 10,5 millones (55%) reciben una gestión adecuada [10]. En la Unión Europea, los RCD alcanzan los 128,58 millones de toneladas anuales [11], mientras que en China la cifra oscila entre 600 millones y 800 millones de toneladas por año [12]. Estos datos reflejan la magnitud de las cantidades de RCD que se deben gestionar exitosamente mediante estrategias de gestión y aprovechamiento adecuadas e innovadoras.

2.1.2 La gestión de RCD y su contribución a la sostenibilidad y la economía circular a nivel global

La implementación de prácticas basadas en la economía circular tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia en el uso de los recursos y de reducir el impacto ambiental de los RCD. Al implementar estas prácticas, se pueden lograr resultados clave, como la disminución de la generación de residuos, la minimización de los efectos negativos del transporte, la maximización de la reutilización y el reciclaje, y la mejora de la calidad de

los materiales secundarios. Además, se optimiza el desempeño ambiental de los métodos de tratamiento [13].

En Colombia, afortunadamente, existen leyes que estipulan la necesidad de proteger, prevenir, controlar y planificar el uso de los recursos naturales, con el fin de garantizar su conservación y asegurar el desarrollo sostenible, respetando el derecho de todas las personas a un ambiente sano [9]. Es en este contexto que la gestión adecuada de los RCD cobra una gran relevancia, debido a su impacto significativo en el medio ambiente.

2.2 Marco legal

2.2.1 Artículos 79 y 80 - Constitución Política de Colombia

Establecen que el Estado debe proteger, prevenir, controlar y planificar el uso de los recursos naturales para conservarlos, garantizar el desarrollo sostenible y el derecho a un ambiente sano. La gestión inadecuada de RCD genera contaminación del aire, agua y suelo.

2.2.2 Resolución 0472 de 2017

Reglamenta la gestión integral de los RCD y establece disposiciones para quienes generan, recolectan, transportan, almacenan, aprovechan y disponen RCD de obras civiles y actividades relacionadas en el territorio nacional.

2.2.3 Resolución 2412 de 2018

Busca reducir el volumen de residuos que van a rellenos sanitarios que los usuarios del servicio público de aseo incrementen la separación en fuente para evitar mayor costo en disposición final.

2.2.4 Ley 1259 de 2008

La ley crea el Comparendo Ambiental para fomentar la cultura ciudadana en el manejo adecuado de residuos sólidos y escombros, previniendo daños al medio ambiente y la salud pública, mediante sanciones pedagógicas y económicas, e incentivando buenas prácticas ambientales.

2.2.5 Decreto 1713 de 2002

Establece normas para reglamentar el servicio público de aseo en la gestión integral de residuos sólidos, a cuidar componentes, niveles, clases, modalidades, calidad, y el régimen de prestadores y usuarios.

2.2.6 Resolución 1257 de 2021

Establece el manejo adecuado de los RCD, optimizando su aprovechamiento, definiendo responsabilidades de personas, empresas y autoridades, fijando metas de gestión y promoviendo la economía circular para el uso eficiente de recursos y el aprovechamiento gradual de los RCD.

2.2.7 Decreto 1076 de 2015

También conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, es una normativa clave en Colombia que busca organizar y unificar las reglas relacionadas con el medio ambiente. En lo que respecta a los RCD, este decreto establece las pautas para su gestión adecuada, con el fin de minimizar el impacto ambiental negativo que estos residuos pueden generar.

3. Estado del Arte

3.1 Introducción estado del arte

El interés por este tema surge de la necesidad de abordar un problema GRCD en el AMB. A través de investigaciones y cuestionamientos, se ha identificado una gestión ineficiente de estos residuos, caracterizada por la escasez de gestores y la falta de métodos innovadores para un manejo sostenible por parte de la CDMB. Esta revisión bibliográfica se centra en encontrar contenido científico actualizado relacionado con la gestión eficiente de los RCD, desde su demolición hasta su disposición final y aprovechamiento, así como en los avances tecnológicos locales y globales para el aprovechamiento de AR de alta calidad. Este tema es relevante porque tiene un impacto social significativo y puede contribuir al desarrollo tecnológico al compartir avances investigativos. Además, ofrece la oportunidad de aplicar los hallazgos en la práctica y contribuir al conocimiento en el campo.

3.2 Investigaciones (Antecedentes)

3.2.1 «Plan de gestión integral de residuos sólidos - PGIRS 2016 – 2027», 2022

Este informe explora el plan de gestión integral de residuos sólidos del AMB, centrandolo su análisis en el apartado que aborda específicamente los RCD. Este apartado detalla la cantidad de RCD generados, su clasificación, los sitios donde son dispuestos, los permisos regulatorios de dichos lugares, los volúmenes de RCD valorizados en el último año y los procesos utilizados para su recolección, transporte y disposición final, como se ilustra en la Fig. 2.

Figura 2. *Tabla II-21 Gestión de RCD*

PARÁMETRO	RESULTADOS								
Cantidades mensuales de RCD generados	<table border="1"> <thead> <tr> <th>AÑO</th> <th>PROMEDIO T/MES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2018</td> <td>59.245</td> </tr> <tr> <td>2019</td> <td>36.077</td> </tr> <tr> <td>2020*</td> <td>18.526</td> </tr> </tbody> </table> <p>Fuente: Reporte anual de cantidades y destino final de los residuos gestionados. (*) Informe de gestión ambiental Junio, 2020.</p>	AÑO	PROMEDIO T/MES	2018	59.245	2019	36.077	2020*	18.526
AÑO	PROMEDIO T/MES								
2018	59.245								
2019	36.077								
2020*	18.526								
Caracterización de los RCD generados	n/d								
Tipo de sitios empleado para la disposición final o aprovechamiento de RCD	Botadero de Tierra el Parque SA								
Autorización ambiental del sitio de disposición final de RCD	Concepto de viabilidad ambiental, Área Metropolitana de Bucaramanga, Oficio DAM-SAM-2427 del 07 de mayo de 2015.								
RCD aprovechados en el último año	En la región no hay cadenas de aprovechamiento de pétreos en volúmenes significativos*								
Recolección y disposición final de RCD	La recolección y transporte es realizado por la empresa generadora del RCD. La disposición final es realizada en el Botadero de Tierra El Parque S.A.								

Tomado de [34].

Los datos revelan que los RCD generados no han sido caracterizados de forma adecuada, y que tampoco se han identificado sitios específicos para su aprovechamiento efectivo. Asimismo, se evidencia que ninguno de estos residuos está siendo valorizado en el AMB, debido principalmente a la carencia de infraestructura y la falta de estudios técnicos que identifiquen opciones viables para su gestión integral. En conclusión, el plan de gestión integral indica que el porcentaje de RCD valorizados en la región es del 0%. Ver Fig. 3.

Figura 3. *Tabla objetivos y metas planteados en el PGIRS.*

ASPECTO	RESULTADO	PRIORIDAD	OBJETIVO	META	PLAZO (FECHA)
1.11 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)					
Cantidad de RCD generados-recolectados	m3/mes	Alta	Definir la tasa de generación de RCD industriales y domiciliarios.	tasa de generación de RCD anual del municipio de Bucaramanga	2023
Caracterización de los RCD generados-recolectados	N/D	Alta	Realizar la caracterización de RCD en sitios de aprovechamiento y de disposición final	Calcular la proporción de RCD susceptible de aprovechamiento.	2023
Recolección de RCD	Recolección y transporte a cargo del generador del RCD	Alta	Disminuir los puntos críticos de arrojo clandestino en el área urbana y rural del municipio.	Registro de trasportadores de RCD implementado en el AMB	2023
Tipo de sitio empleado para la disposición final o aprovechamiento de RCD	Escombrera	Alta	Fomentar el aprovechamiento de RCD en el municipio junto con las empresas del sector constructivo del municipio	1 sitio para aprovechamiento de RCD operando	2023
Autorización ambiental del sitio de disposición final de RCD	Concepto de viabilidad ambiental, AMB, Oficio DAM-SAM-2427 del 07/05/2015	Baja	Garantizar que el sitio de disposición final sea operado de acuerdo con los parámetros de la normatividad vigente.	al menos 1 escombrera autorizada	2022
RCD aprovechados en el último año:	N/D	Alta	Fomentar el aprovechamiento de RCD en el municipio junto con las empresas del sector constructivo del municipio	Estrategias formuladas e implementadas de reducción de generación de RCD y aumento de su aprovechamiento	2023

Tomado de [34].

En esta sección, se presenta una serie de factores problemáticos relacionados con el programa de manejo de RCD. Estas problemáticas se clasifican de acuerdo con su prioridad, donde el valor 1 representa una situación que, aunque no es crítica, necesita atención, mientras que el valor 5 indica un problema grave y recurrente. Cabe señalar que la mayoría de las causas señaladas se ubican en el nivel 4, lo cual refleja que el problema permanece sin solución, ver Fig. 4.

Figura 4. *Tabla programa de gestión de RCD según su priorización de problemas*

PROGRAMA DE GESTIÓN DE RCD		PROBLEMA	GESTIÓN INADECUADA DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA	
		CAUSA 1.	FALTA DE ESTUDIOS E INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DE RCD	4
		CAUSA 1.1	DEFICIENTE REGULACIÓN NORMATIVA MUNICIPAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RCD	4
		CAUSA 2.	INSUFICIENTES ÁREAS E INFRAESTRUCTURA MUNICIPAL PARA LA GESTIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS RCD	4
		CAUSA 3.	FALENCIA EN LOS PROCESOS DE EDUCACIÓN Y CULTURA CIUDADANA PARA LA GESTIÓN DE RCD	4
		CAUSA 4.	INEXISTENTES PROGRAMAS DE APROVECHAMIENTO DE RCD	4

Priorización	Descripción
1	No es problema, pero la gestión es necesaria
2	Puede ser problema si no se gestiona
3	Avances sin llegar a solución
4	Problema persiste
5	Problema persiste y ya es crítico

Tomado de [34].

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición, gestión de residuos, disposición final, aprovechamiento, impacto ambiental, Bucaramanga.

3.2.2. *Cómo la gestión de RCD ha abordado los objetivos de desarrollo sostenible:*

Explorando las tendencias académicas e industriales

Este artículo tiene como objetivo explorar cómo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU inciden en la eficiencia de la GRCD, tal como lo destaca [11]. Asimismo, analiza la evolución temporal de las publicaciones científicas sobre GRCD antes y después de la adopción de los ODS, mediante un enfoque de línea de tiempo. Reconocido por su importancia en el ámbito socioambiental, el artículo identifica investigaciones clave y autores destacados, clasificando los artículos según los ODS tratados y la relevancia asignada a cada uno, como se detalla en la Fig. 5.

Figura 5. *Tabla visiones temáticas emergentes que abordan los ODS en la literatura académica*

Visión temática que aborda los ODS	Colaboradores destacados	Relevancia de los ODS
El cambio en los residuos de la construcción en China	Construcción, negocios y urbanización (Wang et al., 2021) Transformación del tratamiento de RCD en sostenible (Hu et al., 2022)	ODS12
Árido reciclado	Reutilización de residuos de construcción de forma ambiental (Colangelo et al., 2021)	ODS7
Generación de residuos de demolición	Fuente de residuos de construcción y demolición (Aslam et al., 2020)	ODS6
Economía Circular	Mejora de la eficiencia de la valorización de residuos (Wu et al., 2022)	ODS11
Evaluación Ambiental	Impacto ambiental del reciclaje de residuos de construcción (Ghanbari et al., 2018)	ODS14

Tomado de [26].

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición, objetivos de desarrollo sostenible, publicación de investigación, revisión sistemática.

3.2.3 CODD: un conjunto de datos de referencia para la clasificación automatizada de RCD

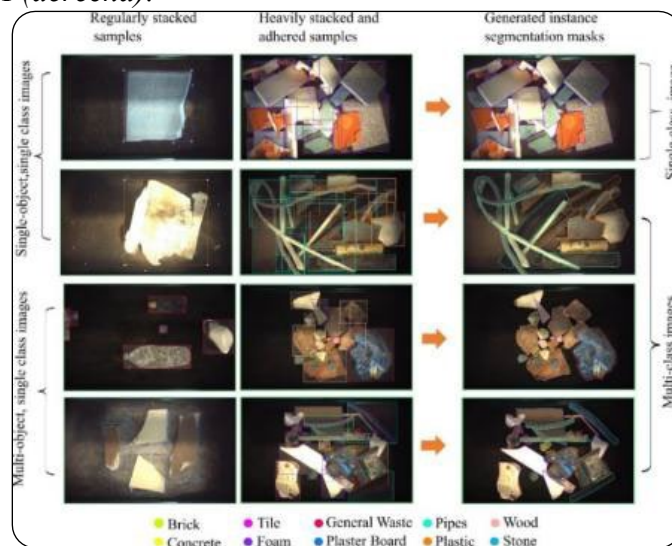
Este artículo de investigación, desarrollado por el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Chipre, aborda la colaboración interdisciplinaria en la clasificación de RCD, con un enfoque especial en la innovación tecnológica. Se presenta un modelo de detección de línea base como un enfoque vanguardista para la GRCD, aplicable tanto a modelos futuros como a métodos actuales de clasificación.

El estudio también investiga la creación de conjuntos de datos de referencia, diseñados para entrenar y probar modelos de detección de objetos y cuadros delimitadores en sistemas automatizados de clasificación de RCD. Este trabajo se enfoca en categorías

frecuentes de RCD, como concreto, ladrillos, tejas, cerámica, madera, vidrio, plástico y metales.

La recopilación de datos se realizó utilizando una cámara HIKROBOT MV-CA023-10GC, la cual capturó imágenes de alta resolución (1920x1200 píxeles) de los residuos en una cinta transportadora. Se prestó especial atención a los parámetros de iluminación, asegurando una reproducción precisa de los colores RGB en las imágenes, simulando los colores reales de los residuos. (Ver Fig.6).

Figura 6. Un ejemplo ilustrativo de objetos anotados en el conjunto de datos que muestra la utilización de cuadros delimitadores (izquierda) y máscaras de segmentación de instancias generadas por SAM (derecha).

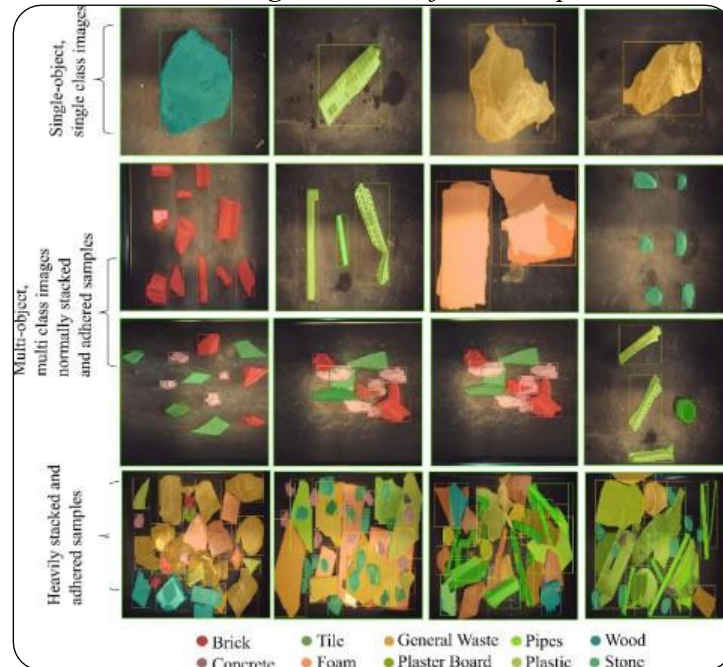


Tomado de [15].

En general se menciona que este método de modelado se realiza a través de un algoritmo de detección de objetos en tiempo real denominado YOLOv8x. con características adicionales, mejor rendimiento o capacidades mejoradas en comparación con las versiones anteriores. Se destaca que este modelo en el momento de colocar diversos residuos ya sea

por separado o en conjunto, responde de manera efectiva, dando así por hecho de que los RCD antes de su disposición final que no estén separados y sin ninguna clasificación se pueden detectar y realizar un proceso más óptimo y eficiente, ver Fig.7.

Figura 7. Se han detectado cuadros delimitadores YOLOV8x-seg (640 × 640) y máscaras de segmentación de instancias en imágenes de conjuntos de pruebas seleccionados.



Tomado de [15].

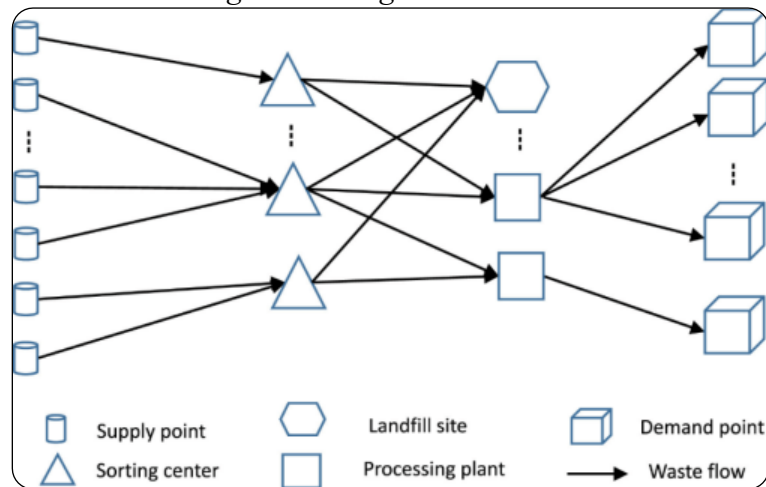
En el artículo se menciona que todo esto es gracias a unas coordenadas de cuadro delimitador que son generadas mediante Segment Anything Model (SAM) que según imágenes le asigna a cada píxel una coordenada lo cual facilitó la conversión entre coordenadas del cuadro delimitador en coordenadas de polígono, esto para poder diferenciar los RCD independientemente de su forma y sus tamaños, en si se trató más que todo de los colores que lograra captar el modelo.

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición, detección de objetos, conjunto de datos de referencia, clasificación automatizada.

3.2.4. Diseño robusto para una red regional de logística inversa de RCD de varios niveles basada en la actitud conservadora de los responsables de la toma de decisiones

Este artículo, elaborado por la Facultad de Economía y Administración de la Universidad de Tongji, en Shanghái, presenta una propuesta innovadora en el ámbito de las plantas de disposición final y aprovechamiento de los RCD. Proponer un enfoque que prometa ser más eficiente en términos de crecimiento económico, transporte, gestión de talento humano y volumen de RCD manejados, en comparación con las plantas de recolección y disposición tradicionales.

La propuesta se basa en el establecimiento de una red de logística inversa, que involucra decisiones estratégicas, tácticas y operativas. Las decisiones estratégicas se centran en el número y ubicación de las plantas de RCD, así como en su capacidad (ver Fig.8). Por otro lado, las decisiones tácticas se enfocan en el flujo de materiales, incluyendo su transporte, mientras que las decisiones operativas abordan el tiempo necesario para la gestión de los RCD hasta su aprovechamiento. Todo ello con el objetivo de satisfacer la demanda, generar beneficios económicos y fomentar la productividad.

Figura 8. Estructura de la red regional de logística.

Tomado de [6].

Palabras clave: Diseño de redes de logística inversa, incertidumbre de suministro, adquisición de capacidad de las instalaciones, optimización robusta

3.2.5 Detección de residuos de demolición de obras en tiempo real utilizando métodos de aprendizaje profundo de última generación; Detectores de una etapa frente a detectores de dos etapas

Este artículo realizado por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Chipre trata sobre un estudio que realizaron en una planta de GRCD tomando muestras aleatorias de residuos de hormigón, ladrillo y baldosas del sitio de disposición (ver Fig.9) para separarlas por medio de brazos robóticos; el autor cuenta también que estos tres tipos de materiales se sacan al final cuando se clasifican los RCD, lo que generalmente se hace a mano porque el material es muy parecido en densidad y composición, por este motivo no se pueden usar métodos automáticos normales como los de aire o magnéticos, pues todas las muestras se emplearon en su estado original; además, cuando algunas resultaron

demasiado grandes para los brazos robóticos, estas se trituraron, ya que superaban el tamaño máximo de apertura de las pinzas del manipulador, que era de 70 mm, ver Fig. 10. Se evidencia que las muestras fueron tomadas de diferentes recolecciones para reflejar la diversidad de los desechos; mediante un prototipo que incluye una cámara industrial que observa el área de trabajo, una cinta transportadora para el material, dos brazos robóticos para clasificar los RCD y un computador especializado, ver Fig.11. De este estudio se obtuvieron análisis variados, ya que dependiendo del tipo de software controlador mejoraba la velocidad y precisión como lo fue con el modelo RetinaNet, en otro caso con el modelo YoloV7x obtuvo mayor precisión y velocidad de inferencia con respecto al modelo COCO, por último, se concluye que los modelos Faster-RCNN muestran una gran resistencia y cambios mínimos en los mAP cuando se enfrentan a conjuntos de datos con objetos que suelen estar muy juntos o superpuestos.

Figura 9. Resultados de inferencia en imágenes que contienen muestras desequilibradas de clase (extraídas de set_1 de prueba).



Tomado de [16].

Figura 10. Brazos robóticos seleccionando muestras, tomado de video del estudio



Tomado de [16].

Figura 11. Muestras separadas de RCD: separación realizada por brazos robóticos sistematizados



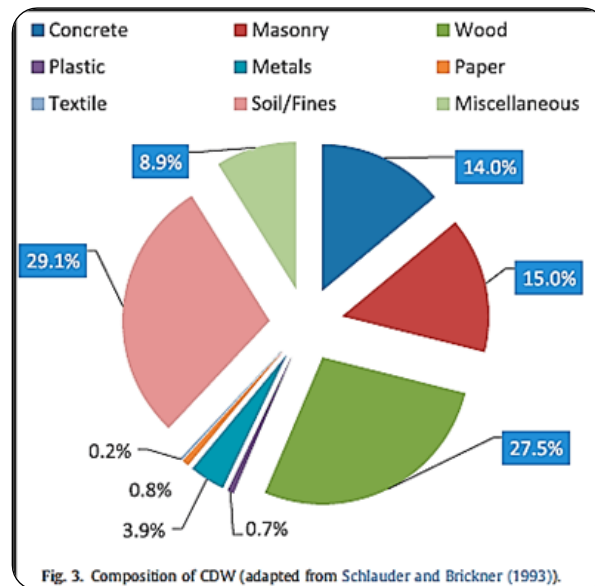
Tomado de [16].

Palabras clave: Detección de RCD en tiempo real, aprendizaje profundo, detectores de una/dos etapas (RetinaNet, YoloV7x, Faster-RCNN), clasificación robótica, áridos reciclados (hormigón, ladrillo, baldosas).

3.2.6 Disponibilidad y procesamiento de áridos reciclados dentro de la cadena de suministro de la construcción y la demolición: Una revisión

Este artículo destaca la necesidad de comprender mejor la gestión de los desechos en la construcción, desde su generación hasta su reciclaje. También aborda los desafíos económicos y ambientales, así como la certificación de los productos finales reciclados. A pesar de que se han identificado varios obstáculos para el uso de AR, la mayoría de ellos pueden superarse mediante: la participación proactiva de las industrias de construcción y demolición, presentando AR como una alternativa técnicamente factible y económicamente viable, aumento de impuestos de vertederos, tasas ambientales y tarifas de acceso para RCD mal clasificados, y una mayor regulación sobre operaciones de vertido ilegal. Dado que la mayoría de las actividades de construcción y demolición son realizadas por pequeñas y medianas empresas, es vital que estén controladas por una entidad externa cuando se involucran en estas actividades, ver Fig.12. Además de alentar a los contratistas a utilizar un enfoque de demolición selectiva, que agrega valor a los RCD, esa entidad también evaluaría su mejor uso o destino posible.

Se logra resaltar la importancia de la implementación de políticas más sólidas, la clasificación de los AR según su desempeño y un enfoque proactivo hacia el reciclaje y la reutilización en la industria de la construcción y demolición para lograr una práctica más sostenible y eficiente.

Figura 12. *Composición de RCD*

Tomado de [36].

Palabras clave: Áridos reciclados (AR), cadena de suministro construcción y demolición, gestión de residuos de construcción y demolición (GRCD), demolición selectiva, sostenibilidad y eficiencia

3.2.7 Uso de áridos reciclados procedentes de RCD en nuevas construcciones

El artículo realizado por la universidad de Lisboa, en compañía de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Birmingham y el Applying Concrete Knowledge del Reino Unido, describe que se está generando un aumento en la demanda global de AR para la construcción, esto ha generado un interés creciente en la búsqueda de alternativas sostenibles. En este contexto, el artículo destaca esta problemática desde una perspectiva innovadora. Se estudia que, en países como Dinamarca, Países Bajos y Alemania han adoptado medidas de GRCD selectiva, lo que ha llevado a altas tasas de reciclaje y promoción de políticas ambientales rigurosas. Como, por ejemplo: En el centro de Zukunftspark,

Wohlgelegen en Heilbronn, Alemania, se construyó en 2012 el WTZ - Centro de Ciencia y Tecnología (RC-Beton, 2018b). En dos de sus edificios están empresas innovadoras en los campos de tecnología médica y ambiental, así como oficinas y laboratorios de tecnología, estos edificios de 5 pisos con sótano, los cuales tienen áreas utilizables de aproximadamente 1900 m² y 2400 m², respectivamente. Se necesitaron alrededor de 1250m³ y 1400m³ de hormigón para las dos estructuras. Todas las mezclas contenían entre un 18% y un 20% de AR tipo 1, según la norma DIN-4226-101 del 2017. Según los autores se crearon diferentes mezclas de hormigón dependiendo de dónde se iba a usar, para los pisos, se usó concreto con niveles de resistencia de C25/30 y C30/37, como se ve en la Fig.14. También se aplicaron niveles de resistencia medioambiental de XC3/XA1/XF1, mostrados en la Fig.13. Las columnas y parapetos en zonas al aire libre se construyeron con la misma fuerza de concreto, pero con una categoría XC4 para resistir mejor al dióxido de carbono del aire y las paredes internas, columnas y losas se hicieron con una categoría de exposición XC1.

Figura 13. *Clases de Exposición Ambiental*

2. Corrosión inducida por carbonatación		
XC1	Seco o permanentemente húmedo.	Elementos de hormigón armado o pretensado dentro de recintos cerrados (tales como edificios), con humedad del aire baja. (HR<65%) Elementos de hormigón armado o pretensado permanentemente sumergido en agua no agresiva.
XC2	Húmedo, raramente seco.	Elementos de hormigón armado o pretensado permanentemente en contacto con agua o enterradas en suelos no agresivos (por ejemplo, cimentaciones).
XC3	Humedad moderada.	Elementos de hormigón armado o pretensado dentro de recintos cerrados (tales como edificios), con humedad media o alta. (HR>65%) Elementos de hormigón armado o pretensado en el exterior, protegidos de la lluvia.
XC4	Sequedad y humedad cíclicas.	Elementos de hormigón armado o pretensado en el exterior, expuestos al contacto con el agua, de forma no permanente (por ejemplo, la procedente de la lluvia)

Tomado de [37].

Figura 14. Resultados de las pruebas de RAC y NAC utilizadas para el Parque de Humedales de Hong Kong

Grado	Nivel de reemplazo (%)	Asentamiento (mm)	Relación W/C	Contenido de cemento (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa) de 28 días
C20	100	75	0.61	300	31.4
	0		0.60	290	32.8
C30	20	75	0.49	360	44.7
	0		0.51	345	42.1
C35	20	100	0.47	395	47.3
	0		0.47	380	48.2
	20	75	0.47	380	47.1
	0		0.48	365	45.8

Tomado de [37].

Palabras clave: Áridos reciclados (AR), construcción sostenible, gestión de RCD selectiva, hormigón con ar, normativa din-4226-101

3.2.8 Análisis de la GRCD del sector residencial en el AMB a través del principio de las 3R

En esta tesis, el autor destaca la contribución del sector de la construcción en el AMB. Además de su aporte al PIB de la región, este sector genera grandes volúmenes de RCD. Se menciona que el reciclaje y aprovechamiento de estos residuos es del 0%. Asimismo, se enfatiza en el método de las 3R: reducción, reutilización y reciclaje, implementado en el AMB gracias a iniciativas de economía circular. Se comenta que la reducción se centra en la disminución de materias primas, bienes de consumo y energía; la reutilización en darle valor

al ciclo de vida de un material; y el reciclaje en aprovechar un residuo sin utilidad para convertirlo en un nuevo producto.

La tesis evidencia que en el AMB no se aprovechan los RCD en las etapas de pre-construcción y construcción, hay una deficiencia de gestores, no se registran buenas prácticas en la administración interna de las obras para el aprovechamiento de RCD, y existe una falta de conocimiento por parte de los consumidores debido a la inexistencia de estándares de calidad para nuevos productos de RCD. Los principales obstáculos que menciona el autor para implementar el principio de las 3R son: la falta de capacitación y socialización de programas para la reducción de RCD, la necesidad de una separación adecuada en la fuente para la reutilización, y la falta de alternativas de separación final para el reciclaje.

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición (RCD), Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), principio de las 3R (reducción, reutilización, reciclaje), economía circular, gestión de RCD en el sector residencial/construcción.

4. Metodología

Se emplea un modelo metodológico mixto, combinando el análisis cuantitativo con la revisión y análisis de información cualitativa. El componente cuantitativo se centró en el análisis de datos numéricos y estadísticos tomados de diversas fuentes documentales, incluyendo artículos científicos, informes técnicos, bases de datos especializadas y estudios de caso relevantes para la temática de GRCD innovadoras y eficientes ajustadas al AMB. El procesamiento y análisis de la información cuantitativa se realizó mediante herramientas informáticas como Excel y Tableau, buscando identificar patrones, tendencias y correlaciones. También, se llevó a cabo la revisión de literatura enfocada en el tema de estudio, incluyendo artículos académicos, publicaciones gubernamentales, normativas y

otros documentos relevantes, con el fin de contextualizar los hallazgos cuantitativos, comprender las dinámicas del sector y responder a los objetivos de investigación planteados desde una perspectiva integral. Este enfoque mixto permitió triangular la información obtenida, fortaleciendo la validez y la profundidad del análisis.

La información recopilada se verifica y se priorizan documentos a partir del año 2015. Aunque el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible inició sus actividades en 2008, la disponibilidad y calidad de la información relevante para esta investigación se incrementa significativamente a partir de 2015, permitiendo un análisis más completo y actualizado del tema de estudio.

Para la redacción del informe final, la metodología se basó en un proceso sistemático de búsquedas, recolecciones de datos, clasificaciones, revisiones y análisis de información relevantes para el tema de estudio. Ver Fig.15.

Figura 15. *Desarrollo metodológico propuesto*

Desarrollo metodológico			
Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
Analizar los métodos de GRCD implementados en otros países y revisar el plan administrativo para su gestión.	Investigación bibliográfica y análisis documental	Recopilar información sobre métodos efectivos de gestión de RCD en otros países, como Alemania, Estados Unidos y UE, y evaluar planes administrativos adaptables al AMB, enfocados en optimizar la producción de agregados reciclados de alta calidad.	Investigador principal
Evaluación de impacto ambiental y económico actual	Análisis de resultados	Evaluar el impacto ambiental y económico de la gestión actual de RCD.	Investigador principal
Investigar aplicaciones de robótica en gestión de RCD	Revisión de literatura	Investigar sobre aplicaciones de robótica en la gestión de RCD, enfocándose en procesos de recolección, disposición, clasificación y aprovechamiento de AR.	Investigador principal

5. Desarrollo

5.1 Revisión de planes administrativos de GRCD en otros países adaptables al AMB

En este apartado se analizan los planes administrativos de gestión en la producción de agregados reciclados de alta calidad, junto con propuestas de mejora que impulsan el crecimiento de la cadena de valor de los RCD. Este análisis se basa en experiencias de gestión aplicadas en otros países, adaptables al AMB. Previo a ello, se presenta el contexto actual de la GRCD en el AMB, para luego contrastar los diferentes planes de administración de estos residuos.

5.1.1 *Gestión actual de RCD en el AMB (Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta)*

5.1.1.1 Marco normativo y legal en el AMB. Actualmente el AMB en temas de GRCD se rige por varias normativas y reglamentaciones al respecto de esta gestión como se detalla a continuación:

5.1.1.1.1 Regulación según el POT. Según el Artículo 48° denominado Escombros y Escombreras, el POT del AMB define que la disposición final de RCD en escombreras públicas, privadas o mixtas se deben disponer en sitios autorizados como lo son el Predio de la antigua ladrillera Bucaramanga, parte del Plan Parcial Provincia de Soto y el Predio Cemex, ubicado en la zona rural al oriente del barrio Colorados, delimitado como escombrera [9]. También se prohíbe depositar los RCD en sitios no autorizados o que sin embargo estén autorizados, pero no se les realice la respectiva gestión técnica [9]. Según este artículo los RCD no se pueden disponer en espacio público, vías, taludes y escarpes, rondas hídricas o cauces de agua o suelos de protección ambiental no autorizados [9].

5.1.1.1.2 Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). Según el PGIRS del AMB, las normativas vigentes para la gestión técnica de RCD son las siguientes:

- *Resolución 472 de 2017 (Modificada por la Resolución 1257 de 2021).*

Para comenzar la GRCD prioriza la prevención y reducción de su generación, seguida del aprovechamiento y, como última opción, su disposición final [31]. Según el artículo 9 de esta normativa la gestión del aprovechamiento de RCD se llevará a cabo en plantas fijas o móviles, que deben tener al menos las siguientes áreas operativas: recepción y pesaje, separación y almacenamiento de RCD aprovechables, proceso de aprovechamiento y almacenamiento de productos resultantes [31].

Los municipios y distritos deben seleccionar sitios específicos para la disposición final de RCD, los cuales pueden ser regionales o locales. Para la selección, deben considerarse varios criterios y una metodología de evaluación, como la oferta ambiental, degradación del suelo, distancia a los cuerpos hídricos, capacidad del área, características geomorfológicas, distancia al centroide de generación, vías de acceso, densidad poblacional y uso del suelo. Cada criterio tiene un puntaje específico para determinar la idoneidad del sitio para la disposición final de los RCD [31].

Lo mismo ocurre con las obligaciones, puesto que los gestores de RCD deben inscribirse ante la autoridad ambiental, contar con los equipos adecuados, expedir constancias a los generadores y reportar anualmente la cantidad y destino de los residuos. Además, deben implementar medidas mínimas de manejo ambiental en puntos limpios, plantas de aprovechamiento y sitios de disposición final. Los municipios y distritos tienen la obligación de ajustar su Programa de GRCD, promover campañas de sensibilización y asignar áreas para la gestión de residuos. Por su parte, la autoridad ambiental debe gestionar

la inscripción de los gestores, hacer seguimiento a sus actividades y garantizar el cumplimiento de la normativa en proyectos que generan RCD [31].

- *Resolución 0754 de 2014.*

Según esta resolución, la GRCD en el AMB debe seguir los lineamientos establecidos en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), que incluyen la recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final de estos residuos. Los PGIRS deben ser formulados, implementados, evaluados y actualizados por los municipios o distritos involucrados, con la participación de actores clave en la gestión de los residuos [32]. Estos planes deben ser adoptados por las autoridades locales mediante actos administrativos, y su ejecución se articula con los POT y los esquemas de prestación del servicio público de aseo. La metodología de formulación de los PGIRS también contempla horizontes de corto, mediano y largo plazo, con seguimiento y control periódico por parte de las autoridades competentes. Además, la integración de la GRCD debe estar alineada con la legislación vigente y se debe promover el aprovechamiento de materiales reciclables en los procesos productivos y comerciales [32].

- *Ley 1259 de 2008.*

Esta ley establece el Comparendo Ambiental como un mecanismo para fomentar la cultura ciudadana sobre el manejo adecuado de los residuos sólidos y escombros. La ley se aplica a personas naturales y jurídicas que infringen normativas ambientales, y las sanciones incluyen desde citaciones educativas hasta multas y servicio social [33].

En el contexto de la GRCD en el AMB, la ley y el indicador de cumplimiento normativo podrían desempeñar un papel relevante en la mejora de la gestión de estos residuos, especialmente si se considera la infracción de no disponer adecuadamente de los escombros, que es una de las violaciones especificadas en la ley [33].

5.1.1.2 Infraestructura y disposición final actual de RCD en el AMB.

5.1.1.2.1 Número y tipos de sitios autorizados para la disposición y gestión de los RCD. Actualmente, la mayoría de los RCD generados en Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón se disponen en Proyectos e Inversiones El Parque S.A., antes Botadero Tierra El Parque, el cual está autorizado por la CDMB y aprobado por las administraciones municipales. En este sitio, los residuos son compactados con maquinaria pesada [43]. Sin embargo, la vida útil del botadero y de otros sitios como el de Piedecuesta no excede los seis meses, lo que representa una preocupación para la GRCD. Además, no existen gestores que aprovechen estos residuos para generar productos de valor agregado. Se espera que el cierre del Relleno Sanitario El Carrasco permita reutilizar material de excavación, ayudando a aliviar esta problemática [43].

5.1.1.2.2 Generación de RCD en el AMB. Con respecto a la GRCD en la mayoría de las áreas metropolitanas en crecimiento es un desafío crucial, y en el AMB no es la excepción. Durante el año 2019, en el AMB se generaron unas cantidades significativas de RCD, estos residuos se generaron a partir de varias actividades en el sector de la construcción como lo son: las excavaciones de tierra, la generación de escombros durante demoliciones, armado y construcción de estructuras. Tener el conocimiento de la magnitud de la generación de estos residuos es fundamental para elaborar estrategias que sean eficaces para su gestión, así como también para promover la sostenibilidad en todos y cada uno de los proyectos constructivos en el AMB, por lo tanto se encuentran estadísticas que a través de la presentación de cifras clave y la identificación de áreas de mejora, se busca ofrecer una visión clara de la situación, destacando la importancia de implementar prácticas de

aprovechamiento y disposición adecuadas en los RCD del AMB. En la siguiente imagen se profundiza la situación y se presenta lo encontrado en [43]. Ver Fig.16.

Figura 16. *Generación de RCD en el AMB.*

Generación de RCD en el AMB			
Tipo de Residuo	Generación	Unidad	Observaciones
Aprovechamiento de RCD	n.d	%	No se dispone de datos precisos sobre el porcentaje de aprovechamiento. n.d significa "no data" o "sin datos".
Disposición en Escombreras	113.425	toneladas/año	Periodo de referencia: 2019
Generación per cápita (RCD)	0,5	toneladas/habitante/año	Periodo de referencia: 2019
Residuos de Excavación	608.937	toneladas/año	Periodo de referencia: 2019
Residuos Pétreos (dentro de los RCD)	115.74	toneladas/año	Periodo de referencia: 2019
Residuos Totales de Construcción y Demolición (RCD)	571.802	toneladas/año	Periodo de referencia: 2018-2019
Tasa de Generación de RCD (general)	131.66	toneladas/año	Periodo de referencia: 2019

Tomado de [43].

5.1.1.2.3 Tratamiento de los RCD: reutilización, reciclaje y disposición final.

Según un estudio realizado por Swiss Contact & Embassy of Switzerland in Colombia, en su artículo publicado llamado Economía circular y enfoque de ciclo de vida en la GRCD: Proyecto de construcción sostenible y economía circular para dinamizar la cadena de valor de la construcción en Santander, realizaron una investigación a obras del proyecto EC2S en proceso de pre-construcción y construcción y se pudo obtener información de como a la fecha de 2020 está siendo la GRCD en el AMB.

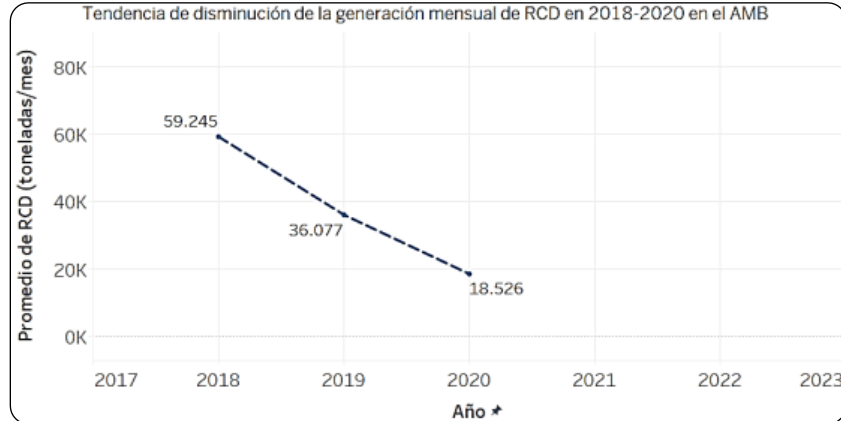
En proyectos piloto que se tienen para la evaluación de GRCD en el AMB no registraban de manera detallada la cantidad de RCD aprovechado, lo que se atribuía a la falta de personal y tiempo, no se llevaba un control adecuado sobre el destino de los residuos [43], para el manejo de los RCD en las obras se delegaba a gestores sin garantías de trazabilidad del destino final, lo que llevaba a que la mayoría de los residuos, especialmente los pétreos y de excavación, terminaban en escombreras, con un uso mínimo en bordillos o rellenos internos, a su vez el aprovechamiento de residuos no pétreos se limitaba a plásticos PET y algunos materiales como madera, que eran reutilizados informalmente o vendidos como combustible [43].

La recolección y transporte de los RCD es realizada por la empresa generadora del residuo. En cuanto a la disposición final, esta se efectúa en Proyectos e Inversiones El Parque S.A Antes Botadero de Tierra El Parque SA. Actualmente, no se cuenta con información sobre la caracterización de los RCD generados [41].

En relación con el tipo de sitio empleado para la disposición final o aprovechamiento de los RCD, se está operando 1 sitio para aprovechamiento de RCD, específicamente una escombrera. La cantidad de RCD aprovechados en el último año no está disponible, pero se han formulado e implementado estrategias desde 2022 para la reducción de la generación de RCD y el aumento de su aprovechamiento [41].

Las cantidades mensuales de RCD generados en los últimos años muestran una tendencia a la disminución, como se observa en los siguientes datos, ver Fig.17.

Figura 17. *Tendencia de disminución de la generación mensual de RCD en 2018-2020 en el AMB*



Adaptado de [41].

5.1.1.2.4 Empresas y gestores especializados en el manejo de RCD. En 2019, el municipio de Bucaramanga contaba con 9 gestores registrados ante la autoridad ambiental, pero aún no se tiene un estimado del porcentaje de aprovechamiento de los RCD en la ciudad. A pesar de que no se encontraron RCD en la última caracterización realizada en el relleno sanitario en 2020, se identificó que materiales tipo escombros aparecen frecuentemente junto a los contenedores de residuos ordinarios, representando el 24,5% de los residuos en puntos críticos [41]. Actualmente, no existen gestores que generen productos de valor agregado a partir de los RCD pétreos y los residuos de excavación, y casi la totalidad de estos residuos se disponen en "Proyectos e Inversiones El Parque S.A Antes Botadero Tierra El Parque", donde son sometidos a un proceso de compactación. Este sitio es el principal encargado de la disposición final en Bucaramanga y los municipios circundantes, pero la vida útil de los sitios de disposición es limitada, lo que representa un desafío para la aplicación de la norma [43].

5.1.1.2.5 Proceso de recolección, transporte de RCD y barreras para el aprovechamiento de estos materiales. Para este proceso, se preparan dos etapas: en la fase de pre-construcción y construcción, se analiza cómo se lleva a cabo la gestión de los residuos, así como también se evalúa la recolección y el transporte de los materiales, identificando los tipos de RCD generados y su destino final.

Antes que nada, se resaltan algunas fallas en el sistema metodológico de este proceso, entre ellas la dificultad de las obras para llevar registros sistemáticos y diferenciados. Esto se debe, en gran parte, a la falta de incentivos, los escasos controles de la autoridad ambiental y la contratación externa a todo costo del manejo de RCD, sin protocolos de trazabilidad efectivos en el transporte y disposición final de estos residuos [43]. Estos registros podrían ser: registro de generación de RCD, registro de transporte, registro de disposición final, registro de aprovechamiento, registro de costos asociados, registro de cumplimiento normativo, en sí estadísticas sobre esta gestión.

Para la etapa de pre-construcción se tienen en cuenta los subprocesos de demolición y subprocesos de Excavación (descapote, cimentación y pilotaje), en los proyectos piloto del Swiss Contact & Embassy of Switzerland in Colombia de GRCD en el AMB, se identificó que la etapa de demolición presenta deficiencias en el control y registro de los residuos generados, especialmente cuando esta se realiza años antes de la construcción. No se documenta el destino final ni el aprovechamiento de los residuos, y la falta de demolición selectiva impide su separación en la fuente, dificultando su reutilización y generación de valor agregado. [43]. Así mismo, para el subproceso de excavación presenta deficiencias en la cuantificación y registro de los residuos generados. Gran parte de los RCD, pese a ser aprovechables, se envían a disposición final debido a la falta de alternativas de reutilización.

Además, no se documentan adecuadamente las buenas prácticas de aprovechamiento interno en obra [43].

Para la etapa de construcción se tienen en cuenta los subprocesos de estructura, obra gris, instalaciones y acabados. En cuanto al subproceso de construcción de estructura se generan diversos RCD, incluyendo áridos, mezclas de concreto, metales, madera, plásticos y residuos peligrosos. Sin embargo, no se realiza una separación adecuada en la fuente, dificultando su aprovechamiento. Los residuos pétreos no se clasifican correctamente, y muchos materiales no pétreos terminan en gestores de residuos peligrosos, incrementando los costos de disposición. Además, existe una falta de control en el registro de la cantidad y destino de los residuos, sumado a la escasez de gestores autorizados para su aprovechamiento en el AMB. [43]. Para la subetapa de obra gris, se generan diversos RCD, tales como sobrantes de áridos, bloques, ladrillos, tejas, morteros, frisos, plásticos y materiales de empaque.

Sin embargo, se observa que no se realiza una separación adecuada de estos residuos en la fuente, lo que dificulta su aprovechamiento. Además, hay deficiencia en el control y registro de la cantidad de residuos generados y su destino final. La falta de gestores autorizados en el AMB para el reciclaje de materiales como drywall, PVC, madera o icopor contribuye a que muchos de estos materiales sean enviados a escombreras o tratados como residuos peligrosos, lo que incrementa los costos de disposición. También se evidencia que las buenas prácticas de aprovechamiento interno no se registran de manera rigurosa. [43].

Para la subetapa de instalaciones se generan RCD como sobrantes de tubería PVC, metálica (acero galvanizado, latón, cobre), cajas eléctricas, viruta metálica, material de empaque, y residuos de adhesivos, lubricantes y limpiadores estos RCD generados pueden ser más complejos en cuanto a la disposición, debido a la variedad de componentes como

tuberías metálicas y materiales eléctricos, que requieren tratamientos y gestores especializados. [43]. Sin embargo, se evidencia que tiene los mismos resultados de análisis que el de obra gris para el proceso de recolección y disposición de RCD. En la subetapa de acabados, se generan diversos residuos, como recortes de baldosa, sobrantes de morteros, frisos, áridos, drywall, retales de hierro y acero, materiales de empaque (plástico, cartón, madera), y residuos peligrosos, como sacos vacíos de morteros, adhesivos epóxicos, y envases de pinturas, para esta subetapa se obtienen los mismos resultados de lo analizado anteriormente en los subprocesos de obra gris e instalaciones. [43].

5.1.1.3 Reciclaje y aprovechamiento de RCD en el AMB.

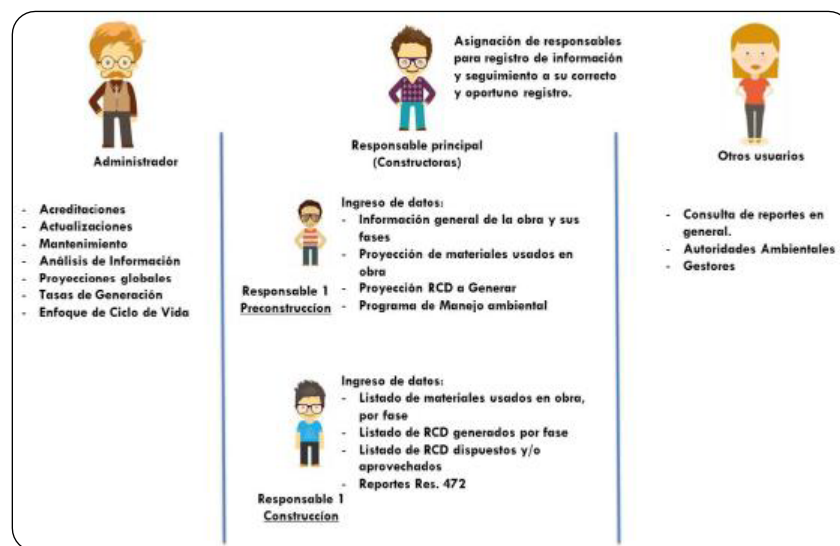
5.1.1.3.1 Empresas o proyectos que reciclan RCD en la región.

- *Proyecto EC2S en el AMB.*

El proyecto EC2S tiene como objetivo mejorar la GRCD en la región, proporcionando a las constructoras herramientas para estimar las tasas de generación de RCD (TG-RCD) específicas por tipo de obra, superficie construida y etapa constructiva. Esto permitirá mejorar la planificación y estandarizar las estimaciones, facilitando la implementación de planes de manejo y la aplicación de la legislación vigente. El proyecto incorpora conceptos de Análisis de Flujo de Materiales (AFM) y Enfoque de Ciclo de Vida, permitiendo la producción de Diagramas Sankey de flujos por etapa constructiva, tipo de residuo y destino final. Aunque el piloto no modeló completamente la fase de demoliciones, se espera que una vez implementada la Consultoría en Sistemas de Información, el módulo sea capaz de cubrirla. Además, se inició un mecanismo de retroalimentación con responsables ambientales y gerentes de obra, identificando cuellos de botella en la implementación y uso sostenible del

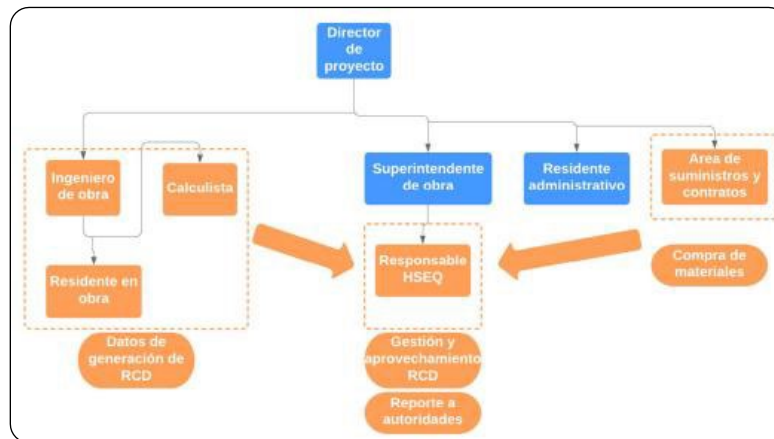
módulo. En cuanto a la GRCD, se encontró que la responsabilidad recae mayormente en un profesional por empresa constructora, no por obra, y solo algunas empresas tienen ingenieros ambientales exclusivos para la GRCD, mientras que otras externalizan este servicio. [43]. Como se muestra en la Fig.18, se describen los roles y responsabilidades generales dentro del módulo de GRCD en el contexto de la construcción.

Figura 18. Roles y responsabilidades generales - Módulo RCD/Materiales – Construcción.



Tomado de [43].

A continuación, se presenta un esquema que ilustra la jerarquía de este proceso de GRCD en los proyectos de construcción, basado en el modelo de gestión EC2S. Cabe resaltar que, en la etapa de pre-construcción, el esquema permanece igual, ya que antes de asignar la responsabilidad al área HSEQ y enviar la información requerida, el área de suministros y contratos no está en funcionamiento. Esta comienza a operar solo en la etapa de construcción, cuando se realiza la compra de materiales y se proporcionan los datos y cantidades necesarios para la obra. De lo contrario, no habría GRCD en esta fase.

Figura 19. *Gobernanza en Obra - Módulo RCD/Materiales – construcción.*

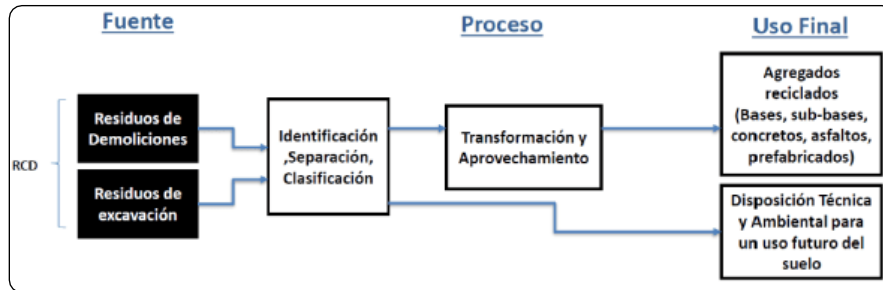
Tomado de [43].

- *Empresa PYSAMB SAS (Proyectos y Soluciones Ambientales JV SAS).*

PYSAMB es una empresa santandereana recientemente conformada con el objetivo de montar una planta móvil de aprovechamiento de RCD. Esta planta tiene como fin asesorar, gestionar y operar proyectos técnicos y ambientales para ofrecer una solución integral en la GRCD, con un potencial de aprovechamiento del 100%. El equipo de la empresa cuenta con más de 13 años de experiencia en el desarrollo y ejecución de proyectos exitosos en diversas ciudades colombianas como Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla [43]. Su propuesta de cadena de valor para el aprovechamiento de RCD incluye la producción de agregados reciclados para la construcción de carreteras, concretos, asfaltos y elementos prefabricados, lo que presenta una oportunidad importante para mejorar la GRCD en Bucaramanga.

Figura 20. Planta móvil para el reciclaje de RCD de la empresa PYSAMB SAS.

Tomado de [43].

Figura 21. Cadena de Valor de RCD pétreos y residuos de excavación de la empresa PYSAMB SAS.

Tomado de [43].

Figura 22. Prefabricados de concreto integrando RCD reciclados de la empresa PYSAMB SAS.

Tomado de [43].

- *Empresa Alfredo Amaya H Cía. SAS.*

Esta empresa llevó a cabo una iniciativa piloto que logró una aplicación comercial exitosa en la región, en colaboración con el proyecto EC2S de la CCB. Consiste en el

aprovechamiento de una parte del material de excavación generado durante la fase de pre-construcción de dos torres del conjunto Cerro de La Cantera, ubicado en la Ciudadela Barrio Blanco, en Piedecuesta. Este material fue utilizado para la fabricación de bloques de tierra prensada estabilizados con cemento [43]. Ver Fig.23 y Fig.24.

Figura 23. *Bloques de tierra prensada estabilizados con cemento de la empresa Alfredo Amaya Cía.*



Tomado de [43].

Figura 24. Cerro de la Cantera – Ciudadela Barrio Blanco – exhibición de Material Durante el Foro Constructor 2019.



Tomado de [43].

5.1.1.2 Generación y clasificación de RCD en edificaciones. Para este apartado, se inicia investigando cuántos RCD se generan en una edificación típica del AMB, qué cantidad de materiales se producen y cómo se clasifican. A continuación, se presenta la imagen "Intensidad de Material en kg/m² para un edificio residencial tipo en el AMB, por tipo de residuo", elaborada por [43]. Ver Fig.25.

Figura 25. *Intensidad Material en kg/m² para un edificio residencial tipo en el AMB, por tipo de residuo*

Origen	Tipo	Elementos	Kg/m ²	Aporte ²⁷
Pétreo	Concreto	premezclado	888,6	67.5%
	Áridos	Arenas, gravas y gravillas	177,3	13.5%
	Mampostería	Ladrillos, bloques, fachaletas ²⁸	82,9	6.3%
	Cemento	Gris , Blanco	29,7	2.3%
	Morteros	Morteros, frisos	29,7	2.3%
	Cerámica, otros	Baldosas, lozas, enchapes, tejas, cartón-yeso	26,2	2.0%
No-pétreo	Metales	Hierro y Acero	51,3	3.9%
	Madera	Madera, empaques	11,2	0.9%
		Madera	0,9	
	Plástico	Plástico, empaques	9,6	0.8%
		PVC	0,8	
		Otros, plásticos	0,1	
	Papel y cartón	Papel, cartón (empaques)	4,5	0.3%
		Papel, cartón	4E-02	
	Otros	Vidrio	4E-04	0.0%
		Ascensor	3,7	0.3%
IM (kg/m ²)			1309	

Tomado de [43].

5.1.1.2.1 Modelos de GRCD en ciudades colombianas.

- *Bogotá DC – Cali.*

Maat Soluciones Ambientales S.A.S. es una empresa especializada en la gestión integral de RCD, ubicada en la ciudad de Bogotá DC y Cali en cumplimiento con la normativa ambiental vigente. Ofrece múltiples servicios para facilitar el manejo adecuado de residuos en los proyectos de construcción, incluyendo un portal de gestión, análisis de beneficios ambientales, certificados de disposición final, dotación de lonas y big bags, entre otros. Su gestión abarca residuos de madera, pétreos, peligrosos, PVC, icopor, drywall y metálicos, asegurando un proceso eficiente y sostenible en la disposición y aprovechamiento de estos materiales [46].

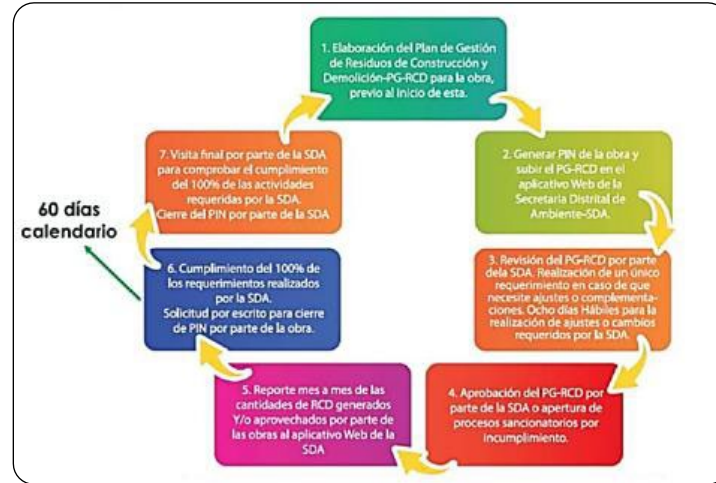
Se destaca que este modelo de gestión participó activamente en la demolición selectiva del Bronx en Bogotá. Además, emplea software especializado para sus clientes y, según la información publicada en su página web [29] en 2022 se gestionaron 9.027.493 materiales dispuestos y 278.103 materiales aprovechados, incluyendo metales ferrosos, madera, residuos pétreos, plásticos, orgánicos y reutilizables.

- *Bogotá DC.*

CEMEX ofrece una solución integral para la disposición técnica y ambiental de los RCD, respaldada por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. Su centro de tratamiento, ubicado en el parque minero-industrial El Tunjuelo en el sur de la ciudad, tiene una capacidad estimada de 5.000.000 m³. El proceso incluye pruebas piloto y ensayos industriales, tanto húmedos como secos, que han sido fundamentales para el desarrollo de futuras normativas en la GRCD. Además, el seguimiento de estos residuos en Bogotá es realizado por dos entidades: la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), que supervisa las obras que generan más de 1 m³ de residuos, y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), encargada de la recolección y disposición de volúmenes menores a 1 m³, como los residuos de remodelaciones menores. Para el 2010, la capacidad de recepción de RCD alcanzó los 3.8 millones de m³, mientras que la cantidad generada por el sector público y privado llegó a los 10.6 millones de m³ [46].

En Bogotá, la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) establece un esquema detallado con los pasos a seguir para llevar a cabo una GIRCD, tal como se observa en la Fig.26.

Figura 26. *Proceso de elaboración y reporte en aplicativo web del PD-RCD*



Tomado de [43].

Según Cemex, “por cada tonelada de Árido RCD que se logra incorporar en los concretos de Cemex se generan los siguientes beneficios” [46].

Figura 27. *Beneficios Cemex - parque minero-industrial El Tunjuelo*

Beneficio	Valor
Reducción del uso de MMPP (mercancías peligrosas) NO RENOVABLE	No especificado
Reducción de recorrido de tractomulas	230 km
Reducción de galones de combustible	46 galones
Reducción de emisiones de CO2	0.1 toneladas
Ahorro en costos de transporte	\$ 29.000/t
Reducción en el tiempo de ciclo	7 horas
Reducción en el deterioro de pavimentos	No especificado
Reducción en accidentes y congestión	No especificado

Tomado de [46].

Figura 28. *Productos primarios a partir de RCD*

Tomado de [46].

Figura 29. *Planta de trituración. Tunjuelo-Cemex*

Tomado de [46].

En proyectos piloto recientes en Cemex Bogotá, se han elaborado planes de ensayo desarrollados por la misma empresa. Ver Fig.30.

Figura 30. Plan de ensayo desarrollado por Cemex Colombia

Tomado de [Fig. 3, 25].

- *Cali.*

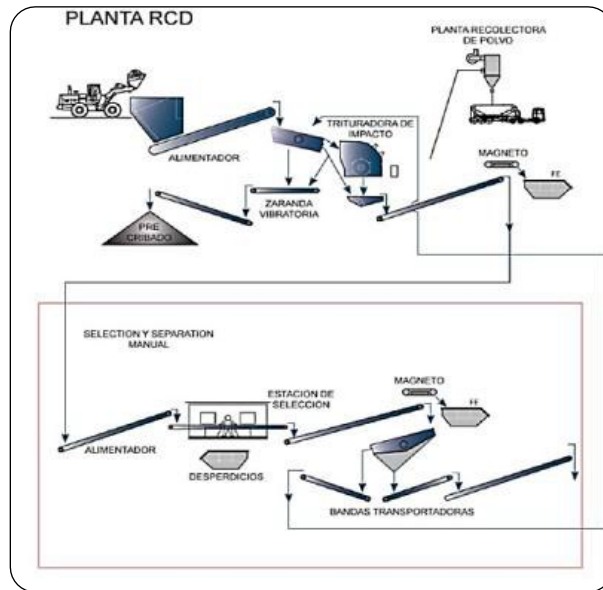
Eco ingeniería S.A.S. lleva más de 16 años ofreciendo soluciones para el aprovechamiento de residuos sólidos industriales y de construcción. La empresa fabrica eco-materiales para la construcción y trabaja en la optimización de concretos convencionales y especiales, reduciendo el uso de cemento Portland entre un 25% y 50%. Además, participa activamente en la educación y formación sobre sostenibilidad, tanto en el ámbito académico como en procesos de difusión. Eco ingeniería también creó la Constructora Páez LTDA, que utiliza residuos sólidos como materias primas para fabricar eco-productos y construir viviendas cumpliendo con las normas nacionales e internacionales. [46].

- *Cota – Cundinamarca.*

Ciclomat es una empresa dedicada al reciclaje y aprovechamiento de RCD, con una planta ubicada en Cota, Cundinamarca. Su proceso de gestión incluye la recepción y disposición de materiales provenientes de demoliciones y desechos de la industria de la construcción, asegurando una correcta selección previa para retirar elementos no aptos para el reciclaje, como madera, plástico y drywall. Posteriormente, los residuos se clasifican para

separar materiales reutilizables y, finalmente, se procesan eco-materiales certificados bajo normas IDU, promoviendo el cumplimiento de la normativa ambiental y la economía circular en el sector de la construcción [46].

Por otro lado, también ubicada en Cota, esta empresa llamada Granulados Recicladados GRECO S.A.S., se dedica a minimizar la disposición final de RCD y maximizar su aprovechamiento. Su estrategia incluye la creación de una cultura de reciclaje y reúso de materiales RCD, como alternativa para sustituir materiales pétreos en la construcción. GRECO realiza diagnósticos y establece un instrumento de seguimiento y control para la gestión integral de los RCD, avalado por la SDA. Utiliza tecnología avanzada como electroimanes para separar metales y sistemas de cribado para clasificar materiales como plásticos, madera y vidrio. Los productos reciclados incluyen gravas y bases granulares para la construcción de pavimentos, especialmente en vías rurales. GRECO recicla aproximadamente 7.000 m³ de RCD mensuales y tiene una planta con capacidad de 200 t/h, generando subproductos como el acero del concreto, que se comercializa con DIACO S.A. [46]

Figura 31. *Planta de RCD Greco S.A.S*

Tomado de [20] [Fig.4, 46]

Figura 32. *Planta de trituración GRECO (Cota- Cundinamarca)*

Tomado de [20].

- *Medellín – Antioquia.*

La empresa Sin Escombros S.A.S. (SINESCO) fue fundada en 2010 como una iniciativa de la Cámara Colombiana de la Infraestructura (CCI) para resolver la problemática de los RCD. SINESCO ofrece un completo portafolio de servicios, incluyendo camiones especializados y cajas estacionarias para la recolección y disposición de los RCD generados en obras, garantizando su manejo adecuado. [46]

5.1.1.3 Problemáticas y desafíos actuales en el AMB.

5.1.1.3.1 Puntos críticos de disposición ilegal de escombros. Según un estudio realizado por [43] en el marco del Proyecto EC2S, hasta el año 2018, el AMB tenía planeadas intervenciones en puntos críticos y áreas subutilizadas para construir aplicaciones no estructurales con RCD, como mobiliario urbano, en el marco del Programa "Retazos Urbanos", coordinado con las autoridades ambientales de los municipios [43]. Sin embargo, aún se espera la definición de la política de GRCD por parte de las nuevas administraciones. En este contexto, el PGIRS de la Alcaldía de Bucaramanga había identificado, hasta julio de 2018, más de 111 puntos críticos de disposición inadecuada de RCD, con más de 90 de estos registrados. También se realizaron visitas técnicas a sectores clave para llevar a cabo jornadas de sensibilización sobre la normativa vigente, como la Resolución 472 de 2017 y la Ley 1801 de 2016 sobre GRCD y comparendo ambiental, respectivamente [43].

Se espera que continúe en operación el Grupo Coordinador del PGIRS, integrado por representantes de la CDMB, el AMB y las empresas encargadas de la recolección de residuos sólidos, proporcionando un espacio adecuado para la integración de iniciativas y el intercambio de información. También se llevó a cabo una investigación sobre la disposición ilegal de RCD. El estudio destaca que, aunque las autoridades ambientales logran identificar

ocasionalmente puntos críticos de disposición ilegal en el AMB, no existen estadísticas confiables sobre el volumen de RCD dispuestos ilegalmente, ni una caracterización adecuada de los tipos de materiales presentes, los cuales, en su mayoría, son RCD mixtos [43].

5.1.1.3.2 Efectos de la informalidad en la recolección y disposición de RCD.

Para este apartado se destaca que uno de los principales desafíos en la GRCD es la disposición inadecuada de los residuos generados por pequeños productores, como los RCD domésticos, que no están sujetos a licencia de construcción. Un gran porcentaje de estos residuos no es registrado oficialmente, y la disposición ilegal, aunque afecta a todos los estratos socioeconómicos, es más común en los estratos 1, 2 y 3 [43]. Aunque el volumen de estos RCD es menor comparado con los grandes generadores, su disposición en áreas verdes, predios rurales y zonas cercanas a cuerpos de agua genera impactos negativos tanto ambientales como en la salud pública. Además, al no estar regulados por los servicios públicos, su disposición no está controlada por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). Esta problemática refleja los efectos de la informalidad en la recolección y disposición de RCD [43].

5.1.1.4 Economía Circular en el AMB. Según el proyecto EC2S de la Embajada Suiza en Colombia junto con el CCB, se pretende una implementación sólida elaborada con un modelo de GRCD para el AMB teniendo en cuenta las distintas fases en los procesos de pre-construcción y construcción los cuales son estructura, obra gris, instalaciones, acabados, remodelaciones y adiciones, excavación y demolición [43].

Dicho modelo se basa en una estrategia de las 3R: reducción, reutilización y reciclaje de RCD. “En un contexto de Economía Circular, a los RCD que inevitablemente tengan que

ser generados se les debe reincorporar a la economía productiva, de preferencia en forma de materiales de similar valor agregado al del material original.” [43].

5.1.1.5 Planes administrativos y estrategias de economía circular de GRCD internacionales teniendo en cuenta algunos temas como: impacto ambiental, económico, social y académico. En este apartado se mencionarán planes administrativos y estrategias de economía circular de GRCD a nivel internacional que estén siendo aplicados o que se encuentren en una fase avanzada de investigación, de manera que su aplicación en un sistema de GRCD en uso sea viable y adaptable al sistema actual en funcionamiento como lo es el del AMB.

Se destaca a continuación un texto elaborado por la UIS donde menciona la importancia de la economía circular para la gestión de residuos: “*Es necesario que Colombia esté a la vanguardia legislativa, económica e industrial, adoptando modelos de economía circular para la gestión integral de sus residuos.*” [46, p.323].

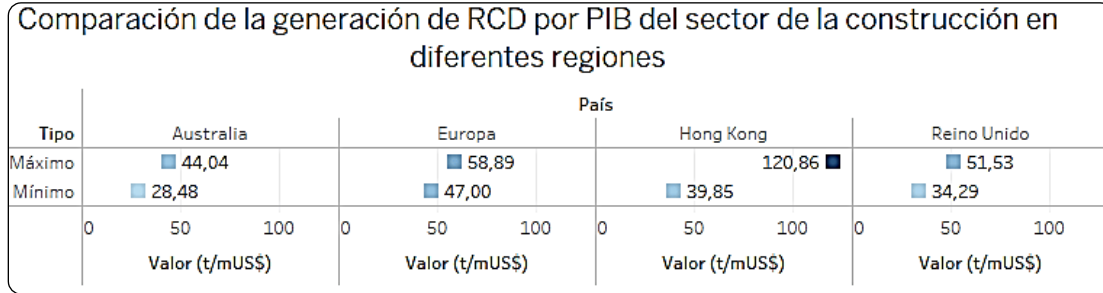
5.1.1.5.1 Australia, Europa, Hong Kong y el Reino Unido. En esta investigación, se realiza un modelo metodológico de análisis interjurisdiccional de la GRCD, también logra se logra establecer un indicador que relaciona la generación de RCD con el PIB del sector de la construcción (RCD/ PIBC) para así saber cuál es el impacto de la actividad económica constructiva en la producción de RCD, a su vez se mencionan estrategias de minimización de impacto ambiental, de economía circular y ámbito académico. “Según el autor, existen varios sistemas importantes de evaluación ecológica, como el método de evaluación ambiental del Building Research Establishment (2008), el sistema Green Globes (Asociación Canadiense de Normalización, 2012), el método de evaluación ambiental de edificios de

Hong Kong (Sociedad HK-BEAM, 2007), el Leadership in Energy and Environmental Design (U.S. Green Building Council, 2008), el sistema de calificación ambiental Green Star (Consejo de la Construcción Ecológica de Australia, 2012), la evaluación Green Mark (Autoridad de Edificación y Construcción de Singapur, 2012) y la herramienta GB (Cole y Larsson, 2002).”; [48].

Los sistemas de evaluación ecológica tienen un impacto significativo en la GRCD, ya que fomentan prácticas más sostenibles en el sector de la construcción. Según el autor [48], para tener en cuenta estos sistemas de evaluación ecológica se pueden basar en cuatro estrategias clave como lo son evitar la generación de residuos mediante un diseño eficiente y la renovación en lugar de la demolición; reducir la producción de desechos a través de tecnologías constructivas más limpias y procesos como la deconstrucción; reutilizar materiales mediante su clasificación y aprovechamiento in situ; y reciclar mediante el establecimiento de plantas de tratamiento y la conversión de residuos en nuevos materiales, como los AR. [48].

Para el análisis con respecto a la generación de RCD y el PIB en el sector constructivo se resalta que cuanto mayor es el valor, más residuos se generan en relación con la actividad económica del sector.

Figura 33. Comparación de la generación de RCD por PIB del sector de la construcción en diferentes regiones del mundo



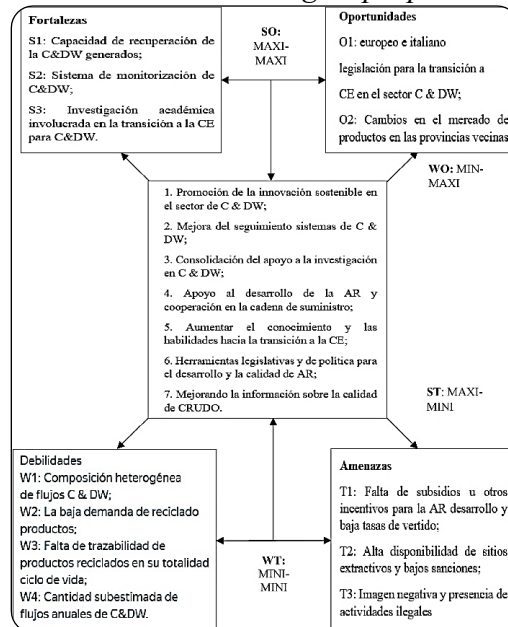
Adaptado de [48].

En relación con esta investigación, se concluye que la generación de RCD está vinculada al perfil y las prácticas de la economía de la construcción. Para lograr mejores resultados, se recomienda compartir conocimientos entre las diversas áreas de la industria, tanto en el ámbito constructivo como económico, a fin de mejorar la GRCD. Esto se observa en la baja y estable relación entre los RCD y el PIB en los países analizados. Desde el ámbito académico, se destaca la falta de datos en algunos países, lo cual limita la capacidad de llevar este estudio a un nivel que permita una comparación más generalizada entre jurisdicciones de RCD. [48].

5.1.1.5.2 Nápoles – Italia. Para comenzar con esta estrategia de estudio, se enfatiza que se integraron datos estadísticos oficiales, TIC y cartografía para el análisis caracterización de los materiales de construcción en edificios existentes, así como la generación y GRCD en la Ciudad Metropolitana de Nápoles (Italia), una de las áreas más urbanizadas de la UE. El objetivo fue explorar la transición hacia una economía circular en el sistema de GRCD. El análisis se basó en datos públicos, la herramienta i-Tree Canopy y el análisis FODA. [38].

Según lo anterior, se estableció un listado de siete estrategias aplicables al modelo FODA y a la matriz TOWS, tanto en las empresas gestoras de RCD como en la Ciudad Metropolitana de Nápoles, Italia.

Figura 34. Relación entre el análisis FODA y la matriz TOWS. La interacción entre las estrategias SO, WO, ST y WT en la matriz TOWS refleja impactos de mejora recíprocos. Estos pueden aprovecharse a partir de las siete estrategias propuestas en el cuadrante central.



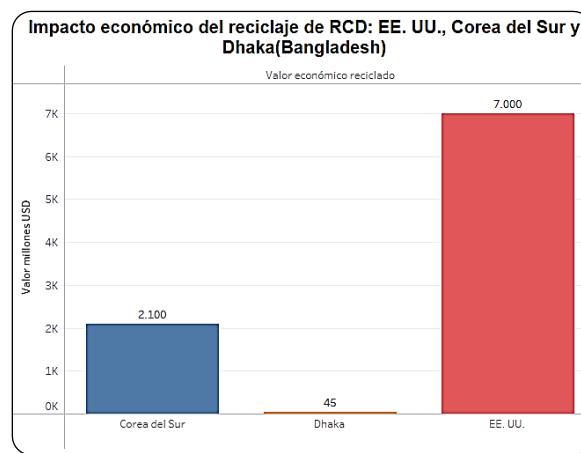
Adaptado de [38].

La transición hacia una economía circular en la Ciudad Metropolitana de Nápoles implica convertir los aspectos negativos actuales en oportunidades para adoptar modelos más sostenibles en la GRCD. Tanto la legislación europea como la italiana están promoviendo y exigiendo esta transición a través de planes y normativas [38].

5.1.1.5.3 Dhaka – Bangladesh. El sistema de GRCD en Dhaka, capital de Bangladesh, no es óptimo ni eficaz debido a la falta de una evaluación de impacto ambiental

y una clasificación adecuada de los RCD por parte del gobierno. Ver Fig.35, Esto se debe a la ausencia de datos sobre las características y la estructura de la generación de estos residuos, lo que complica el aprovechamiento de los RCD en la región. Sin embargo, este estudio ha avanzado significativamente en la investigación, proponiendo las estrategias más adecuadas para mejorar la GRCD en su región. Ver Fig.36.

Figura 35. *Impacto económico del reciclaje de RCD en Corea del Sur, Dhaka y USA*



Adaptado de [35].

Figura 36. *Estrategias para mejorar el reciclaje de RCD en Dhaka (Bangladesh)*

Aplicación de legislación gubernamental	Asignación de espacios para residuos reciclables	Capacitación y concientización	Instrumento económico para el reciclaje	Promoción de calidad en productos reciclados
Se debe aplicar la legislación para aumentar el reciclaje de residuos de construcción y demolición.	Asignación de espacios en cada barrio para el almacenamiento y traslado de residuos reciclables.	Proporcionar capacitación y concientización a los trabajadores de obras de construcción.	Se aplicará un instrumento económico sin añadir impuestos para incentivar actividades de reciclaje.	Promover la buena calidad de los productos reciclados para incentivar el reciclaje de residuos de C&D.

Adaptado de [35].

5.1.1.5.4 Shenzhen – China. En esta investigación se toma como ejemplo Shenzhen, en la cual su metodología de investigación es mixta que incluye análisis documental, entrevistas semiestructuradas y estudios de campo. Además, se utilizaron los modelos competitivos PEST y las Cinco Fuerzas para analizar el entorno externo de las estaciones de RCD. Con base en el modelo de cadena de valor de Porter, se propuso un marco de cadena de valor circular para examinar los recursos y capacidades internas. A partir de ello, se identificaron los principales desafíos que enfrentan las EDDR y se presentaron sugerencias para fomentar su desarrollo. Los resultados más relevantes destacaron varios obstáculos a superar. Ver Fig.37.

Figura 37. Barreras y contramedidas de los CDWRE.

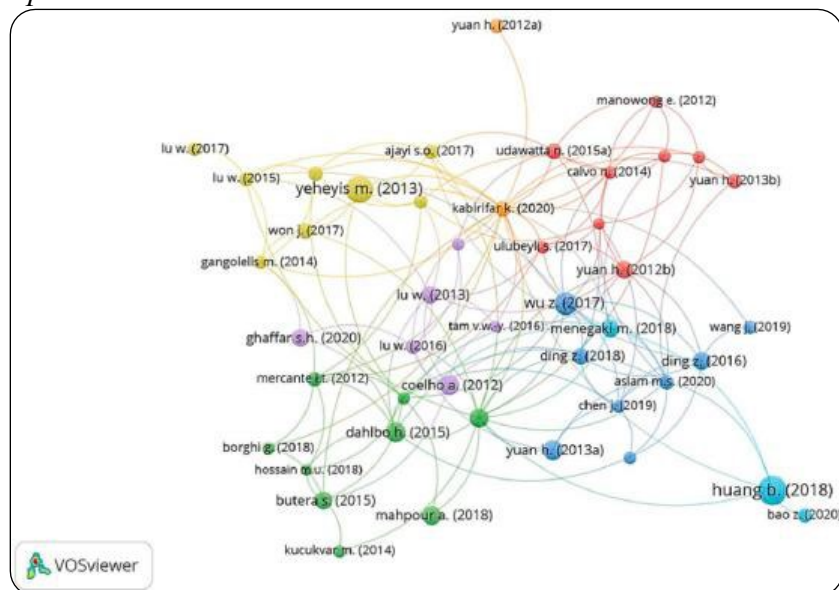


Adaptado de [50].

El gobierno chino y el de Shenzhen han promovido políticas e iniciativas que impulsan el reciclaje de RCD, como: “Pico de carbono, neutralidad de carbono.”; “Las aguas claras y las montañas verdes son tan valiosas como las montañas de oro y plata.”; “Ciudad esponja.” [50].

5.1.1.5.5 Hangzhou – China. Este texto resalta la importancia de la investigación realizada en la ciudad de Hangzhou en los ámbitos económico, ambiental, social y de GRCD. Los datos sobre publicaciones y colaboraciones entre países pueden servir como referencia para analizar cómo distintas regiones abordan la economía circular en la GRCD y qué estrategias han sido más efectivas a nivel internacional. Sin estudios como este, resulta difícil desarrollar estrategias para mejorar los sistemas de GRCD. Por ello, el aporte académico de esta investigación es fundamental, y para su desarrollo se utilizaron herramientas como VOSviewer y CiteSpace.

Figura 38. Mapa visual de los artículos más citados en los estudios sobre GRCD.

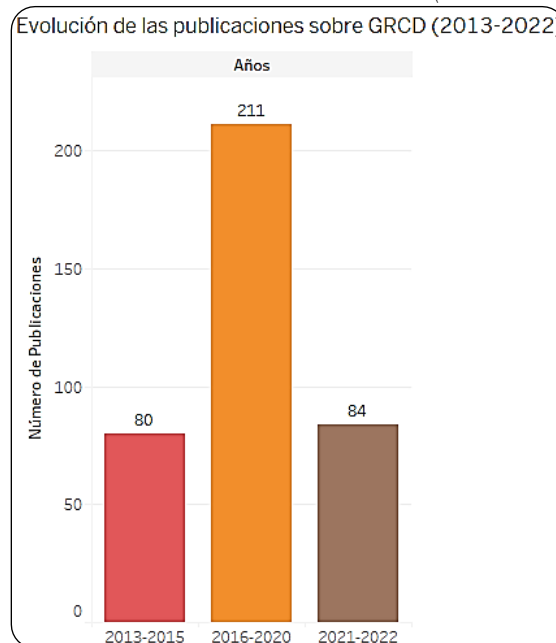


Tomado de [2, pág. 6].

Se baso en análisis de bibliografía académica de los años (2013-2022), en este análisis se tuvo en cuenta variables como: países líderes en el ámbito de la GRCD, autores destacados de la GRCD, líneas de tendencias de publicaciones, las fuentes más relevantes, los artículos más citados basados en RCD y la coocurrencia entre las palabras clave [2]. Según la

aplicación de estas herramientas de software antes mencionadas que se utilizaron como método para estas mediciones, se logró encontrar un patrón de publicaciones a lo largo de los años que se dividió en tres etapas: una fase de desarrollo entre 2013 y 2015; un periodo de crecimiento entre 2016 y 2020; y una caída en las publicaciones en 2021-2022 tal como se observa en la siguiente imagen. [2].

Figura 39. *Evolución de las Publicaciones sobre GRCD (2013-2022).*

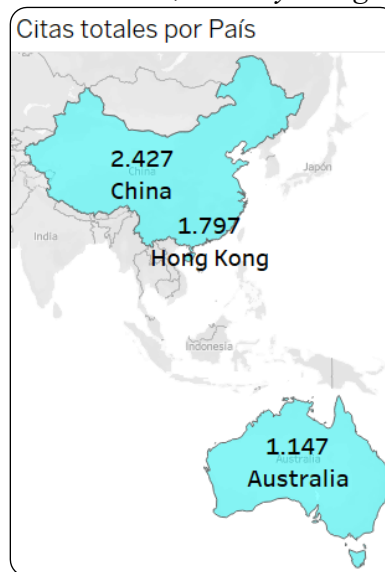


Adaptado de [2].

Según la tendencia presentada y las estadísticas, el autor menciona que, en lugar de producir más publicaciones generales, los investigadores se están enfocando más en temas específicos, avanzando hacia estudios más detallados y especializados en lugar de simplemente aumentar la cantidad de trabajos publicados, por esta razón la disminución en la cantidad de artículos publicados. [2].

A continuación, en las siguientes imágenes, se presentan estadísticas de los países que han sido más citados, así como los países que han publicado más artículos y su impacto en las variables mencionadas a nivel internacional.

Figura 40. Citas totales por país: Australia, China y Hong Kong.



Adaptado de [2].

Figura 41. Publicaciones por país: Australia, China y Hong Kong.



Adaptado de [2].

Figura 42. *Impacto y conectividad global en la investigación sobre RCD.*

Adaptado de [2].

5.2 Análisis de métodos innovadores más recientes para la GRCD, implementados o en fase avanzada de estudio en otros países

5.1.2 Método preventivo en la generación de RCD mediante la extensión de la vida útil en edificaciones de Dinamarca, Alemania, Reino Unido, Finlandia y Alemania

Antes que nada, se debe recalcar que, con una creciente conciencia sobre la sostenibilidad y la eficiencia a nivel mundial en el uso de los recursos, extender la vida útil de los edificios existentes debería ser una prioridad antes de considerar su demolición. Estas estrategias no sólo reducen la generación de RCD, sino que también contribuyen a reducir el impacto ambiental del sector de la construcción al minimizar el consumo de energía asociado a nuevos materiales y producción. Por eso, antes de realizar una demolición, se puede analizar la viabilidad técnica y económica de rehabilitar, renovar o reutilizar estructuras existentes para maximizar su potencial y minimizar su impacto ambiental. Reutilizando componentes o reciclando materiales de estos edificios se genera mayores beneficios medioambientales.

[7].

Este método propuesto por el Project CIRCuIT de la Unión Europea (2019-2023), se basa en la identificación de edificaciones con alto riesgo de demolición, lo que permite priorizar acciones para extender su vida útil y prevenir la generación de RCD.

5.1.1.6 Analizar los patrones del sector inmobiliario. El análisis de datos del sector donde están los edificios permite analizar las construcciones que estén en riesgo de demolición, utilizando mapas, registros de edificios y bases de datos textuales.

5.1.1.7 Identificación de factores externos. Este método se centra en la evaluación del riesgo de demolición de un edificio considerando factores contextuales, las expectativas del propietario y las tendencias del sector. Se propone un análisis que involucra la ubicación del edificio y las perspectivas de los actores clave.

5.1.1.7.1 Análisis del entorno (Ubicación). Valor del suelo, normativa urbanística, infraestructuras y servicios, características del entorno.

5.1.1.7.2 Evaluación de las expectativas del propietario. Intereses económicos, necesidades de uso, capacidad financiera.

5.1.1.7.3 Análisis de las tendencias del sector. Tendencias del mercado inmobiliario, innovaciones en la construcción, sostenibilidad y eficiencia energética.

5.1.1.7.4 Perspectiva de los actores clave. Agentes inmobiliarios, empresas constructoras, administración pública.

5.1.1.8 Adopción de un enfoque multimétodo. Este enfoque se basa en los dos anteriores, ya que cada apartado incluye un paso a paso detallado, como se muestra en: Apéndice A, Apéndice B, Apéndice C y Apéndice D al final de este documento. Estos fueron tomados del método Project CIRCuIT [7]. de modo que cada método se complementa, formando así un enfoque multimétodo.

5.1.1.9 Estadísticas positivas del método. Como ejemplo se tiene un proyecto en Alemania denominado Gröninger HÖf Parkhaus en Schleswig-Holstein este se destaca por la adaptación sostenible de un edificio protegido el cual tiene un valor patrimonial. En 1950 fue construido para ser un concesionario de carros, en el 2020 se realizó la restauración de este edificio siendo convertido en apartamentos y gimnasio, esta fue una intervención que se enfocó en la preservación de elementos históricos, como la fachada de cristal, y la adición de tres niveles, logrando ahorros significativos en materiales, RCD y generación de CO₂. Este proyecto se destaca por ser una gestión eficiente de RCD que logra integrarse en la rehabilitación de edificaciones históricas, combinando la conservación de patrimonio histórico con prácticas modernas y sostenibles que minimizan RCD, maximizan el aprovechamiento de materias primas y materiales.

Figura 43. *Vista sección transversal: propuesta de remodelación de Gröninger Höf Parkhaus.*



Tomado de [7].

Figura 44. *TDA Hamburgo, 2024.*



Tomado de [51].

Según el informe del proyecto CIRCuIT:

“El refuerzo de la capacidad de carga de la estructura hizo posible la construcción de tres niveles adicionales para apartamentos de vacaciones. Esto supuso un ahorro de 321

toneladas de materiales, 186 toneladas de residuos y 74 toneladas de emisiones de CO₂. El costo de la intervención circular fue un 4,2% inferior al demoler y construir de nuevo”.

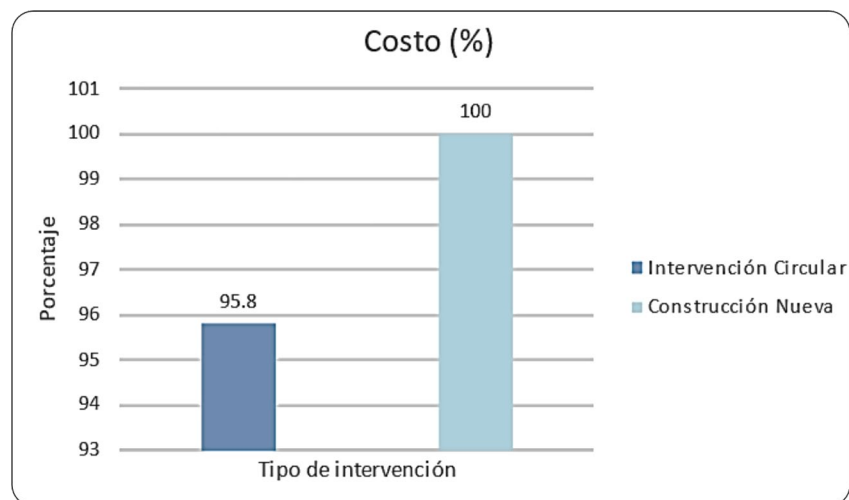
Tomado y adaptado textualmente de [7].

Figura 45. *Proporción de ahorros en materiales, residuos y emisiones de CO₂.*



Adaptado de [7].

Figura 46. *Comparación de costos entre intervención circular y construcción nueva.*



Adaptado de [7].

5.1.2 Método BIM-CDW Info Model: Aplicación en la GRCD en Brasil y Portugal

El método BIM-CDW Info Model es igualmente relevante para la cadena de GRCD. Ha sido adaptado según la norma ISO 16739-1:2024 (Clases de fundamentos de la industria (IFC) para compartir datos en las industrias de construcción y gestión de instalaciones), considerando además estadísticas de datos que actúan como indicadores de RCD.

Este método contribuye a una gestión eficiente de los RCD a lo largo del ciclo de vida de una construcción, complementándose con el modelado de información de edificios BIM, la implementación de economía circular, la predicción de riesgos y el desarrollo de estrategias eficaces para la GRCD.

Por otro lado, antes de describir el procedimiento paso a paso, es importante señalar que este modelo BIM se estructura en seis pasos, cada uno de los cuales se subdivide en uno, dos o tres subpasos dependiendo del paso a desarrollar como se muestra en la Fig.47.

Figura 47. Pasos del modelo conceptual para la GRCD basado en BIM.

Identificación del problema y la motivación	1.º : Desarrollar una revisión de la literatura sobre la aplicación de BIM en la gestión de RCD y su relación con la evaluación de sostenibilidad en la construcción (BSA). 2.º : Aplicación de un cuestionario a profesionales de la industria AEC para evaluar los requisitos de RCD desde la BSA.
Definición de los objetivos de la solución.	3.º : Propuesta de una lista de indicadores para la gestión de RCD. 4.º : Definición de los componentes constructivos y tipos de RCD que formarán parte del análisis del modelo conceptual. 5.º : Análisis de la interoperabilidad de los indicadores de RCD en un modelo BIM basado en IFC.
Diseño y desarrollo	6.º : Desarrollo de la estructura del modelo conceptual para la gestión de RCD basado en IDM/MVD propuesto por buildingSmart . 7.º : Modelado de la información en el formato estándar IFC.
Demostración	8.º : Demostrar la aplicación del modelo conceptual y analizar la información generada. 9.º : Exportación de los resultados para la preparación del informe final de RCD.
Evaluación	10.º : Evaluación del modelo de información y exploración de las posibilidades de aplicación en la gestión de RCD y análisis ambientales.
Comunicación	11.º : Publicación de artículos científicos y trabajos para la difusión de la investigación.

Adaptado de [1].

Según la definición y el modelo conceptual descrito, este método se empieza a desarrollar mediante una revisión bibliográfica que recopiló estudios similares, considerando variables que influyen en la ocurrencia de los eventos. Se enfocó en la aplicación de la metodología BIM en la GRCD y su impacto ambiental.

Luego, se aplicó una encuesta a profesionales del sector de la construcción para comparar la Evaluación de la Sostenibilidad de los Edificios (BSA), la cual analiza parámetros de sostenibilidad en la construcción. El autor menciona como ejemplo una herramienta BIM la cual puede estimar y clasificar los RCD por tipo según el número de elementos y niveles de construcción.

Con los resultados del cuestionario, se propuso una nueva serie de indicadores de RCD, más alineada con el objetivo de estudio y la normativa IFC, Estos indicadores como se muestran en la Fig.48, deben ser fáciles de medir y calcular, comprensibles incluso para personas sin experiencia en el tema. Además, deben estar adaptados a la vida real, cumplir con los requisitos de una buena GRCD, integrarse con la información BIM y permitir una estandarización continua [1].

Figura 48. *Indicadores RCD para el modelo de información BIM-CDW.*

INDICADOR	VARIABLE	DESCRIPCION
Diagnóstico RCD	DI - 1	Cuantificación de los tipos de residuos
	DI - 2	Clasificación de los RCD según LoW
	DI - 3	Relación elementos x tipos de residuos
	DI - 4	Cálculo del RCD en función de la zona de construcción
	DI - 5	Reutilización de materiales de otras obras
Valoración RCD	VI - 1	Reutilización de materiales
	VI - 2	Reciclado de materiales
GRCD	IG - 1	Destino de los residuos
	IG - 2	Cálculo de las ganancias derivadas del reciclado de materiales
	IG - 3	Cálculo de las ganancias derivadas de la reutilización de materiales

Adaptado de [1].

Para el siguiente paso del modelo conceptual, se emplea una estructura denominada IDM/MVD, utilizando software especializado en la creación de mapas para modelado descriptivo, como Bizagi Modeler. Ver Apéndice E. Este proceso permite calcular los indicadores mencionados anteriormente, extrayendo los datos del modelo IFC para realizar los cálculos correspondientes con el ejemplo de aplicación. Toda esta información se almacena en el administrador BIM, utilizando herramientas como Jupyter Notebook, IfcOpenShell y Python, así como un esquema de buildingSMART para el IFC. Todo esto tiene como objetivo extraer datos y valores numéricos sobre elementos, materiales, cantidades, volumen, área, lista de materiales, entre otros. Del artículo de este método se extrae información sobre los tipos de formatos que se emplean en el modelo, así como los formatos externos como se puede observar en la Fig. 49.

Figura 49. *Tipos de información y formatos de archivos en la GRCD mediante BIM.*

Tipos de información utilizados	Formatos de archivos - formatos externos
Modelo de arquitectura	.ifc
Modelo de estructura	.ifc
Extracción de cantidades	Elementos, materiales, superficies y volúmenes (.rvt, .ifc o .xls)
Lista de WGI	.txt, .doc o .xls
Índices de reciclado, reutilización o reaprovechamiento	Bases de datos externas
Indicadores de RCD	
Código de clasificación de residuos	

Adaptado de [1].

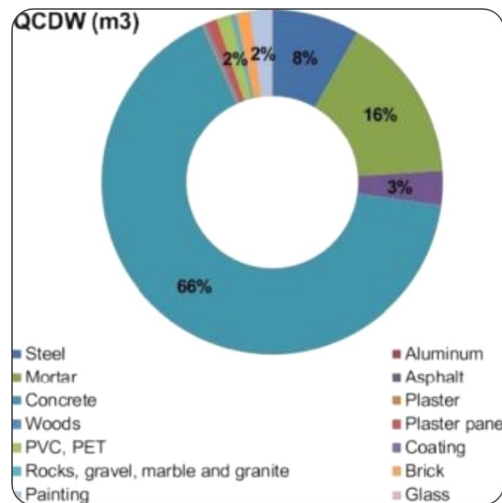
Para finalizar con el método el autor menciona: “La última tarea para finalizar la aplicación del modelo de información BIMCDW es evaluar los resultados y elaborar un informe sobre la GRCD teniendo en cuenta los resultados obtenidos. Un profesional BIM valida este informe” [1, pág. 5].

5.2.2.1. Estadísticas positivas del método. Tal como se muestra en la Fig.50. Porcentaje de residuos generados en el edificio por tipo de material., para este análisis, se realizó un estudio sobre un edificio, enfocándose en los elementos muro, revestimiento y losa. De estos se extrajo el área en m² y el espesor en metros para luego calcular el volumen en m³. Posteriormente, se aplicó el Índice de Generación de RCD (WGI) para estimar la cantidad de residuos en volumen (m³).

“La multiplicación del WGI por la cantidad total de materiales tomados del modelo del edificio permite estimar los residuos de la construcción.” [1, pág. 7]. Según el procedimiento previamente descrito, se logró identificar una gran parte de los residuos generados por un edificio antes de su demolición. Sin embargo, se destaca la necesidad de

un mayor manejo de datos para determinar la reciclabilidad de cada material, su importancia y la cantidad que puede ser recuperada en su mayoría, todo esto inmerso en el mundo BIM.

Figura 50. *Porcentaje de residuos generados en el edificio por tipo de material.*



Tomado de [1].

5.1.3 Método para la mejora de la GRCD en Pekín y Shanghai (China) basado en las 3R

La metodología de GRCD se analiza desde varios puntos de vista, principalmente en áreas metropolitanas y rurales. Antes de su implementación, se realizan entrevistas a 40 personas para obtener sus perspectivas y recomendaciones sobre el tema, con el fin de que sirvan a los políticos y actores responsables de la GRCD. Además, se lleva a cabo un estudio sobre las normas de diseño de edificaciones, con el objetivo de reducir la generación de RCD, así como una estimación de los costos de operabilidad y eliminación, factores que afectan la planificación urbana del área estudiada.

Tal como el autor menciona en un apartado llamado: Estrategias para superar los obstáculos en la GRCD [5, pág. 5] la metodología que se emplea se subdivide en 5 parte

clave tal como se puede observar en la Fig.51, del método de GRCD basándose en los elementos de estudio anteriormente mencionados y en la metodología de la 3R (reducir, reciclar y reutilizar).

Figura 51. *Estrategias para superar los obstáculos en la GRCD.*

1. Diseñar un modelo de economía circular eficaz
2. Reforzar el control de las fuentes
3. Mejorar la supervisión y la gestión
4. Adoptar tecnologías y modelos de mercado innovadores
5. Incentivos económicos

Adaptado de [5].

A partir de estos pasos, se propone como primera instancia que los RCD, una vez demolidos, sean aprovechados no solo en el sector de la construcción, sino también en el sector industrial, debido a la diversidad de aplicaciones que pueden tener; Para continuar como segunda instancia, se plantea que los distintos entes regulatorios en China, como el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural, la Oficina de Planificación y las Organizaciones de Diseño de Edificios, refuercen el control y elaboren planes de concientización y colaboración sostenible [5]. Esto debe realizarse en conjunto con las constructoras, permitiendo el desarrollo de programas de construcción ecológica y la gestión coordinada de los RCD. Por otra parte, como tercera estrategia, se propone que la contratación pública incluya la adquisición de materiales reciclados provenientes de RCD, con el fin de fomentar su uso, aumentar su demanda y contribuir a su popularización en el mercado. En cuanto a la cuarta estrategia, el método enfatiza la importancia de incrementar la investigación en tecnologías adecuadas para el reciclaje y aprovechamiento de los RCD.

Además, si es necesario demoler o retirar una edificación, se recomienda optar por construcciones diseñadas para su desmantelamiento sin necesidad de una demolición total, promoviendo el uso de estructuras prefabricadas. Estas no solo reducen la contaminación in situ derivada de los procesos de construcción, sino que también ofrecen un enfoque más sostenible. [5].

Como incentivo para la investigación, esta estrategia resalta la importancia de implementar becas, tanto en el ámbito educativo como para fomentar la continuidad en líneas de investigación, desarrollo y demostración de tecnologías relacionadas con proyectos de reciclaje y reutilización. De la misma manera en que se proponen mercados innovadores y avances tecnológicos, esta estrategia plantea la creación de un software o plataforma de información que permita analizar y consultar datos sobre los RCD. Esto incluiría, por ejemplo, el monitoreo en tiempo real de los volúmenes generados, la localización de los sitios de almacenamiento según las empresas gestoras, y la gestión integral de estos materiales por parte de grandes y pequeños generadores. [5].

Asimismo, la plataforma proporcionaría información sobre la capacidad de carga de las plantas de aprovechamiento y reciclaje, promoviendo una simbiosis industrial y un trabajo coordinado entre los generadores de RCD, receptores, empresas gestoras y demás actores involucrados en el proceso. De esta forma, se garantizaría el acceso a estadísticas actualizadas para la toma de decisiones estratégicas. [5].

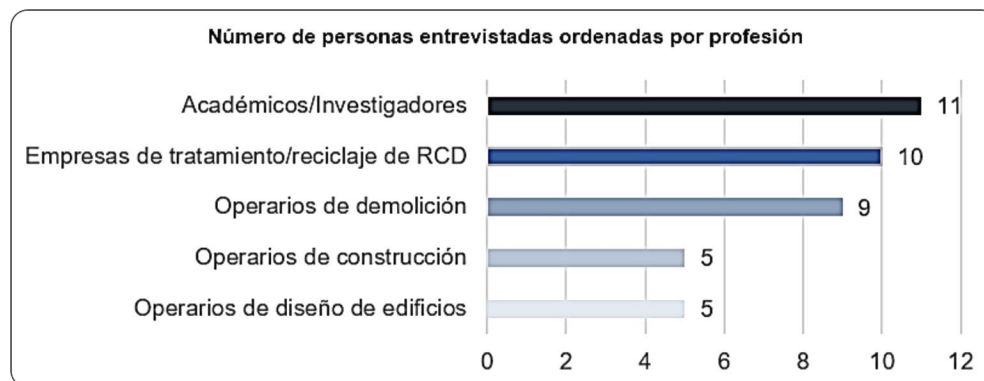
Además, esta estrategia sugiere una mejora en la gestión del transporte de RCD mediante la implementación de un sistema de posicionamiento global (GPS) en los camiones transportadores. Esto permitiría monitorear sus rutas y evitar la eliminación indebida de los residuos en sitios no autorizados, asegurando un manejo más eficiente y controlado. [5].

Por último, la quinta estrategia del método se enfoca en brindar incentivos económicos tanto a nuevas empresas en el ámbito de la GRCD como a las ya existentes, con el objetivo de promover un mercado sólido y desarrollado de RCD. Algunos de los incentivos sugeridos incluyen la implementación de subsidios dirigidos directamente a apoyar proyectos de reciclaje, reutilización y aprovechamiento de RCD. [5].

Además, se propone otorgar beneficios fiscales a las empresas que adopten prácticas sostenibles en la GRCD, así como ofrecer préstamos con tasas de interés bajas y ampliar el límite de crédito disponible por parte de los bancos para estas empresas. También se recomienda reducir el tiempo de adquisición de estos préstamos y simplificar los trámites administrativos para facilitar la operación de plantas de reciclaje o vertederos controlados, siempre bajo una estricta supervisión del gobierno local para evitar irregularidades. [5].

Otro incentivo planteado es la reducción del costo del arrendamiento de terrenos para las empresas operadoras de RCD, lo que contribuiría a fomentar la inversión en este sector y fortalecer la economía circular. [5].

5.2.3.1 Estadísticas positivas del método. Para este método, las estadísticas positivas se basaron en las 40 personas entrevistadas, quienes contribuyeron en gran medida a estas propuestas. Esto se debe a que son expertos en el tema y conocen en detalle la problemática actual de la GRCD en China. Las respuestas que se generaron recopilaron y analizaron según fuesen las más frecuentes o parecidas (ver Apéndice F) para así poder identificar los desafíos y en que se estaba fallando, también se destaca que se realizó una revisión detallada de cada norma aplicada en el sector del manejo de los RCD en China, analizando un total de un 11 normativas.

Figura 52. *Distribución de entrevistados por profesión en la GRCD en China.*

Adaptado de [5, pág. 37].

5.2.4 Método químico-métrico y espectroscópico para la caracterización, cuantificación y GRCD en materiales cerámicos mediante XRF, DRX, SWIR y Raman en ESPAÑA

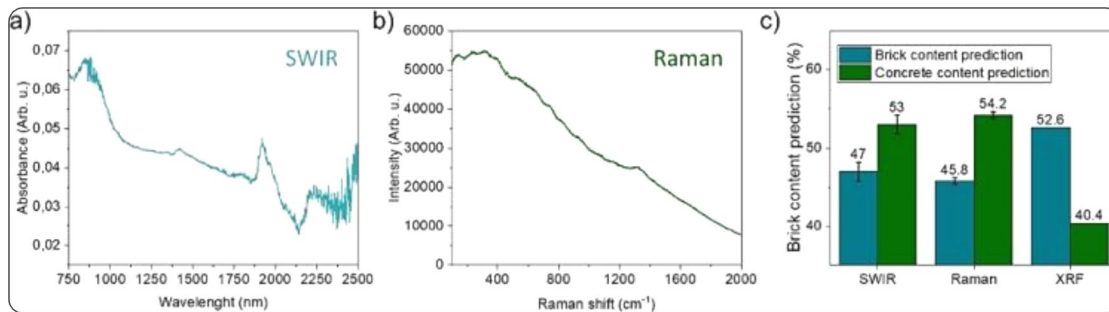
Este método se presenta como una metodología innovadora y, según los resultados obtenidos, demuestra ser eficaz en la valorización de los RCD como materia prima en la clasificación de ladrillo rojo cerámico. Antes de detallar el paso a paso del proceso, es importante mencionar que se trabajó con dos tipos de materiales: materiales nuevos (seleccionados específicamente para el estudio, como ladrillo rojo y bordillo de hormigón) y RCD reales (provenientes de una planta de reciclaje en Castellón, España) [40]. Para garantizar la precisión de las mediciones, todas las muestras fueron sometidas a un proceso de homogeneización en cantidades similares, asegurando la coherencia en los análisis realizados. Además, se agregaron aditivos y materiales reflectantes para mejorar la precisión en la espectroscopia [40]. Una vez listas las muestras, se realizó un análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) para determinar los elementos químicos presentes en los materiales, identificar su composición y los elementos relevantes para la clasificación. Luego, se llevó a cabo una determinación por pérdida de calcinación para evaluar la estabilidad térmica de los

materiales. Posteriormente, se realizó un análisis de composición mineralógica mediante difracción de rayos X (DRX), lo cual permitió identificar los minerales presentes en los residuos, facilitando la clasificación de los materiales en cerámica, hormigón o ladrillo [40].

Continuando con el proceso, se utilizó un espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 650 UV-Vis-NIR en el rango de infrarrojos de onda corta (SWIR, 750-2500 nm) para analizar la capacidad de los materiales de absorción de luz, utilizando una esfera integradora recubierta con Spectralon® [40]. Además, se empleó un espectrómetro Raman portátil de B&W Tek, que mediante un láser genera señales únicas de la muestra para identificar su estructura [40]. Este análisis se realizó varias veces para asegurar que los resultados fueran representativos. Finalmente, los datos obtenidos de todos estos análisis se incorporan en el software BWIQ® (versión 4.1.4) de B&W Tek, que interpreta la información para implementar métodos estadísticos avanzados, como el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales de Kernel mejorado (IK-PLS-DA) [40]. Con este método se logró identificar con precisión los materiales que componen los RCD como se observa en la Fig.53, lo que facilita su separación y aprovechamiento en nuevas aplicaciones.

Figura 53. *a) Absorbancia SWIR en bruto, b) Espectros Raman de la muestra real de RCD en las mismas condiciones que los modelos, c) Predicción del contenido de ladrillo y*

hormigón en la muestra desconocida de RCD mediante espectroscopia SWIR, Raman y XRF, con error estimado (%)



Tomado de [40, Fig. 6].

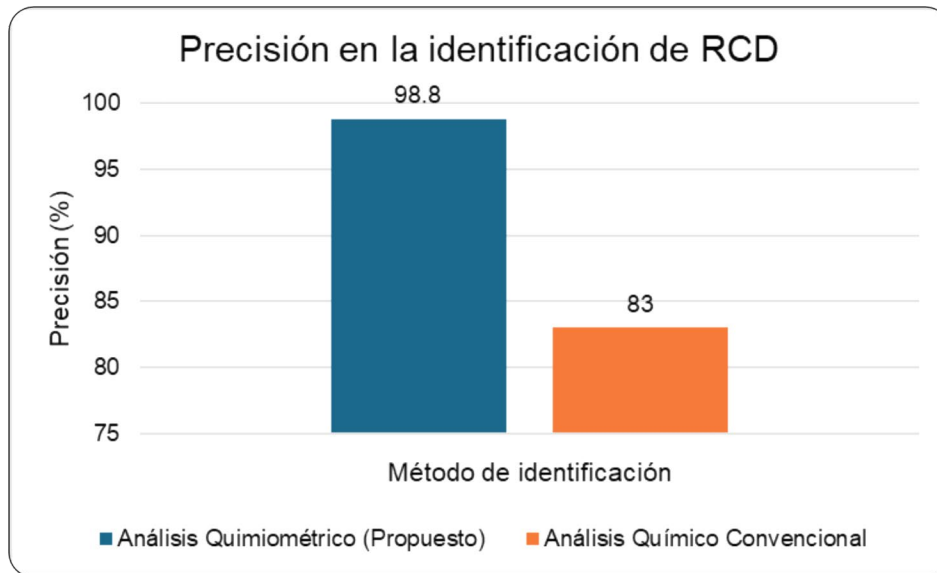
5.2.4.1 Estadísticas positivas del método. A continuación, se presentan diversas ilustraciones de las estadísticas positivas más destacadas de este método, mostrando las estimaciones más probables al aplicarlo al mercado de RCD, así como los avances que se pueden lograr y los prospectos que ofrece como método de gestión.

Figura 54. Estadísticas numéricas positivas extraídas del artículo de Marín-Cortés et al. (2023), *Chemometric-driven quantification of construction and demolition waste using Raman spectroscopy and SWIR*.

Concepto	Valor	Unidad	Fuente / Contexto
Coste estimado de materias primas RCD	0,55 €	m ²	Incluye transporte y transformación.
Costo de materias primas convencionales	1,29€ - 1,81€	m ²	Incluye transporte
Ahorro en costes de materias primas	Hasta 1.000 millones de €	Anual	Estimado en la UE28
Proporción de materias primas locales	12% - 53%	%	Varía según el producto cerámico.
Fracción fina de RCD aprovechada	10%	% en pesos	Previamente ignorada
Estimación de ahorro anual en la UE28	700-1.400 millones de €	Anual	Basado en la valorización de RCD

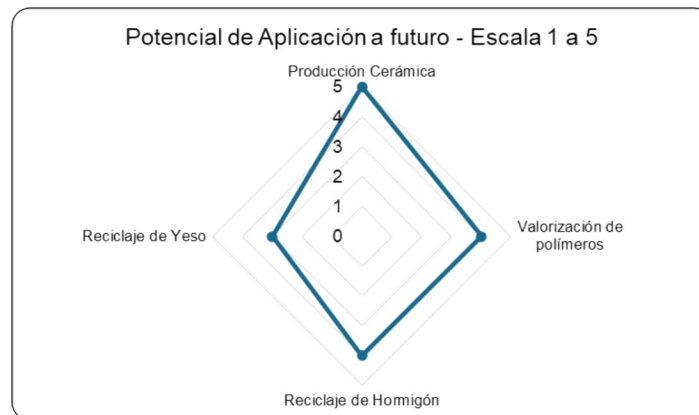
Adaptado de [40].

Figura 55. Precisión en la identificación de los RCD obtenidos mediante diferentes métodos (SWIR, Raman, y XRF) tomados de Marín-Cortés et al. (2023), Cuantificación química de RCD mediante espectroscopia Raman y SWIR.



Adaptado de [40].

Figura 56. Potencial de aplicación futura de la espectroscopia Raman en el reciclaje de RCD.



Adaptado de [40].

Figura 57. *Beneficios de la espectroscopia Raman en la clasificación de RCD.*

Característica	Ventaja
Requisitos de preparación	Mínimos
Tiempo de medición	Corto
Idoneidad para operación continua	Alta
Dependencia de técnicos expertos	Baja

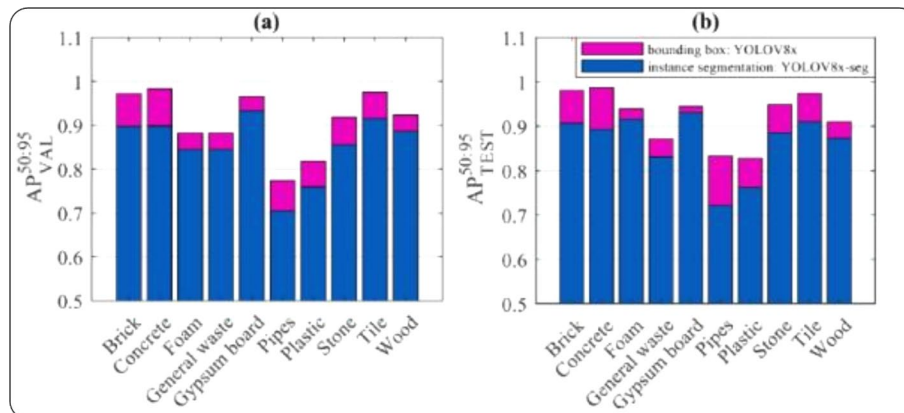
Adaptado de [40].

5.2.5 Investigación sobre aplicaciones de robótica en la GRCD a nivel global (Nicosia –

Chipre)

En concordancia con lo planteado en el estado del arte de este documento [15], el método de Conjunto de datos de detección de objetos en RCD (CODD), permite analizar y almacenar información de una variedad de materiales de RCD que son comunes en fases de pre-construcción, construcción y demolición, en este estudio se pudo realizar lectura de datos de RCD de 10 materiales los cuales son: placas de yeso, piedras, madera, ladrillos, hormigón, baldosas cerámica, residuos en general, plásticos y espuma aislante. [15], lo anterior tal como se puede observar en la Fig.58.

Figura 58. Rendimiento del modelo YOLOV8X en la segmentación de cuadros delimitadores e instancias por clase de objeto en (a) el conjunto de validación y (b) el conjunto de prueba.

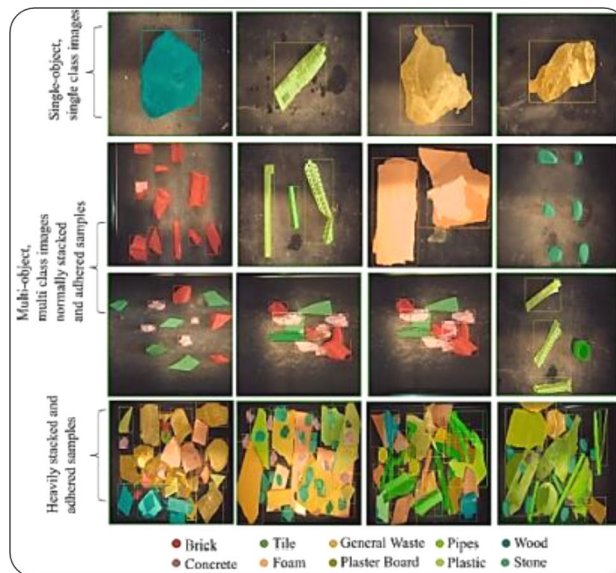


Tomado de [15, Fig. 7].

En los datos obtenidos, la mayoría de los objetos pueden delimitarse con cuadros y contornos precisos, permitiendo determinar su forma y tamaño con exactitud. Esto demuestra la capacidad del modelo YOLOV8x-seg para identificar con alta precisión los RCD (ver Fig.59)

En el ámbito académico, los autores sugieren que la comunidad constructiva y científica debe esforzarse por avanzar hacia una aplicación más generalizada y eficaz de la clasificación de RCD. [15]

Figura 59. Cuadros delimitadores YOLOV8x-seg (640× 640) y máscaras de segmentación de instancias detectadas en imágenes de prueba seleccionadas.

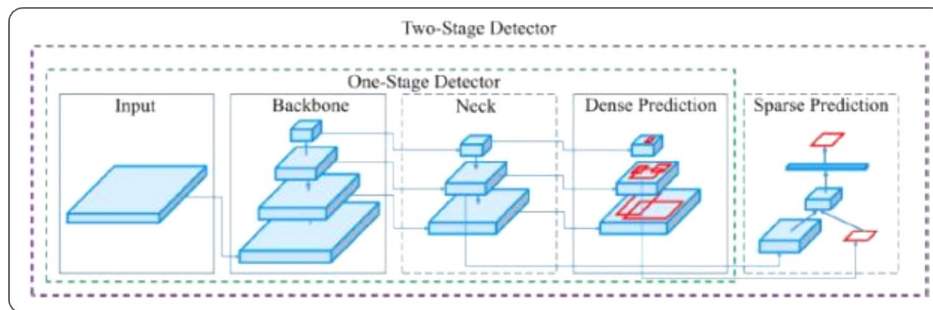


Tomado de [15, Fig. 8].

En consecuencia, a continuación, se presenta otro artículo del mismo país y autor [16], el cual se detalla con mayor profundidad en el estado del arte de este documento. En este estudio, la aplicación de la robótica se basa en el uso de modelos de aprendizaje profundo para la detección automatizada de RCD mediante inteligencia artificial (IA), utilizando software especializado como YOLO, Faster-RCNN y SSD, fundamentales para la visión por computadora en aplicaciones robóticas.

Estos modelos contribuyen a mejorar la clasificación y segmentación en sistemas robóticos de RCD, así como a enfrentar escenarios de trabajo complejos que representan entornos reales donde operarían los robots. En este contexto, se destaca que YOLOv7x ofrece la mejor precisión (~70% mAP50:95) con tiempos de inferencia reducidos (<30 ms), lo que permite que los robots autónomos sean más eficientes en la clasificación de RCD en tiempo real [16].

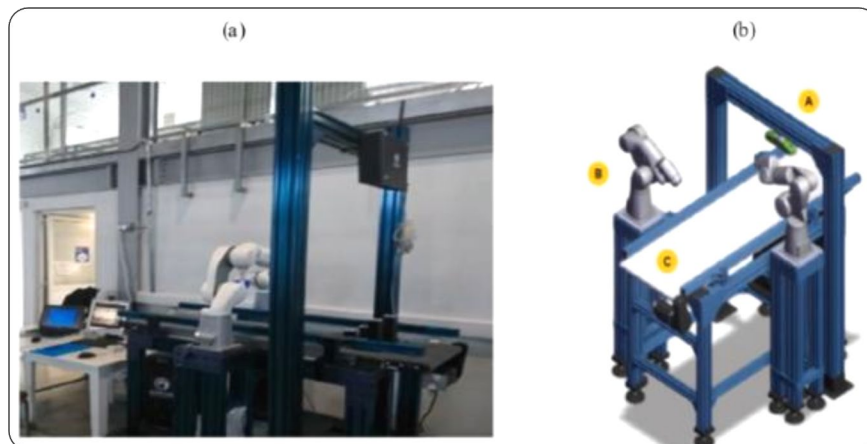
Figura 60. Arquitectura del detector de objetos de una y dos etapas (Bochkovskiy et al., 2020).



Tomado de [16, Fig. 8]

La detección eficiente de residuos es clave para el desarrollo de robots autónomos para la clasificación y separación de RCD, según el autor RetinaNet es una opción que permite generar mayor velocidad y precisión, lo que puede ser útil para robots industriales que priorizan eficiencia energética. [16]

Figura 61. (a) Fotografía y (b) Ilustración esquemática del prototipo de estación de clasificación de RCD compuesto por (A) una cámara RGB, (B) un brazo manipulador robotizado y (C) una cinta transportadora.



Tomado de [16, Fig. 1]

Todo lo anterior nos introduce en un entorno de robots e inteligencia artificial optimizada, que contribuyen a la GRCD en un sistema ya en funcionamiento, mejorando la velocidad y eficiencia de clasificación, lo cual es de gran importancia, como se menciona en un artículo titulado Revolucionando la clasificación de RCD: perspectivas de la IA y las aplicaciones robóticas. El autor comenta que estas aplicaciones de la robótica en la GRCD tienen “la importancia de adoptar un enfoque de clasificación indirecta para mitigar los desafíos de la clasificación directa, tales como los altos costos laborales, los riesgos para la salud de los operadores, las limitaciones de las propiedades físicas para identificar los tipos de desechos y la baja eficiencia” [16]

6. Resultados e impacto

6.1 Datos recopilados a partir de la muestra

Se recopiló información de repositorios y bases de datos sobre los registros de disposición de RCD en el AMB entre 2015 y 2025, identificando 14 gestores de RCD y analizando su trazabilidad dentro del sistema de GRCD. Se evidenció la falta de actualización en bases de datos para los años 2024 y 2025., los datos obtenidos de la CDMB (2023) y el PGIRS AMB (2022) permitieron evaluar las tendencias en la GRCD.

Para el análisis cuantitativo, se utilizaron Excel y Tableau, mientras que el análisis cualitativo incluyó bibliografía nacional e internacional sobre metodologías de gestión, encuestas y estudios sobre la generación de AR de alta calidad.

El estudio comparativo mostró deficiencias en infraestructura, rigurosa aplicabilidad de normativas y aprovechamiento de RCD en el AMB. Con base en estos hallazgos, se

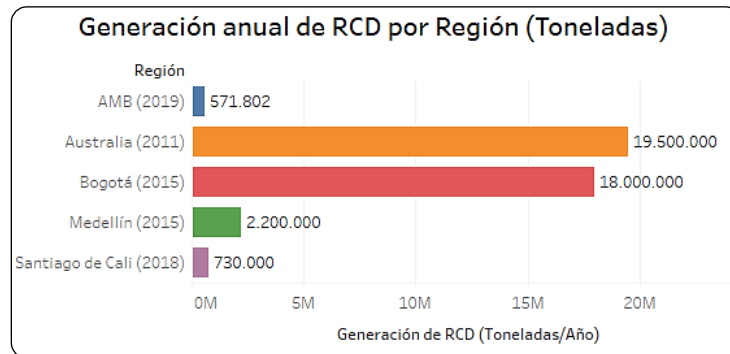
propusieron soluciones enfocadas en optimización tecnológica, fortalecimiento normativo y estrategias de economía circular.

6.2 Identificación de desafíos en la GRCD en el AMB

Se identificaron grandes desafíos en la GRCD en el AMB, principalmente por la falta de infraestructura, la escasez de gestores, las deficiencias en aplicabilidad normativa y las limitaciones económicas. En este apartado, se presentan los principales obstáculos y sus impactos económicos, sociales y ambientales, junto con estrategias basadas en experiencias exitosas en Colombia y otros países, dando respuesta a la pregunta de investigación planteada.

6.2.1 Escasez de gestores de RCD y falta de infraestructura

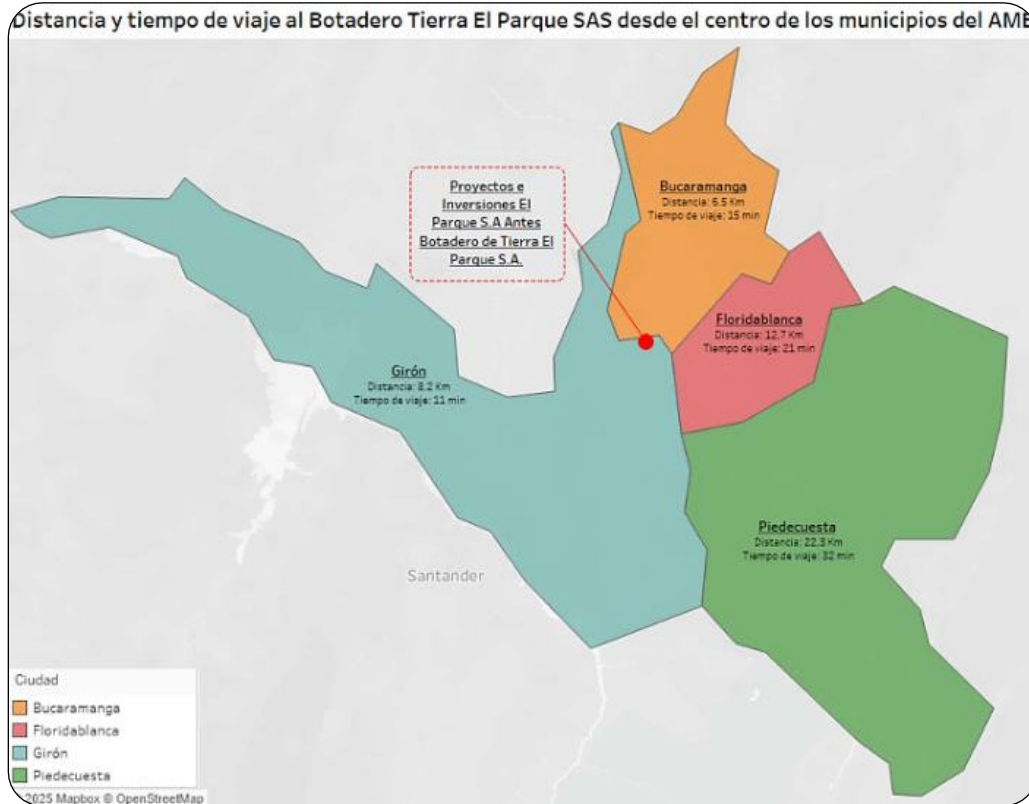
En 2019, el AMB contaba con 9 gestores de RCD registrados y certificados ante la CDMB, autoridad ambiental de la región. Esta oferta resultó insuficiente para la cantidad de residuos generados, ya que en el mismo año se produjeron 571.802 toneladas de RCD, de las cuales 113.425 toneladas (19.83%) fueron dispuestas en escombreras, sin datos precisos sobre su aprovechamiento [43].

Figura 62. *Generación Anual de RCD por Región (Toneladas).*

Adaptado de [22] [46] [41].

En cuanto a la infraestructura de gestión, se evidenció que la mayoría de los RCD generados en el AMB se disponen en Proyectos e Inversiones El Parque S.A. (antes Botadero de Tierra El Parque S.A.). Aunque este sitio compacta los residuos, carece de estrategias efectivas de valorización [43]. Además, su ubicación, alejada de varios municipios, encarece el transporte de residuos, afectando la rentabilidad del aprovechamiento de RCD [41]. Las distancias al botadero Proyectos e Inversiones El Parque S.A. varían según la ciudad de origen: Bucaramanga se encuentra a 6,5 km (15 minutos), Girón a 8,2 km (11 minutos), Floridablanca a 12,7 km (21 minutos) y Piedecuesta a 22,3 km (32 minutos). Esta diferencia impacta especialmente a los municipios más alejados, donde los altos costos de transporte pueden desincentivar la disposición adecuada de residuos y fomentar su disposición ilegal en sitios no autorizados. Ver Fig.63.

Figura 63. Distancia y tiempo de viaje a Proyectos e Inversiones El Parque S.A Antes Botadero Tierra El Parque SAS desde el centro de los municipios del AMB.



Se identificaron deficiencias en la GRCD en el AMB en los diferentes subprocesos de las etapas constructivas, tanto en pre-construcción como en construcción tal como se muestra en la Fig.64. Estas deficiencias se atribuyen a la escasez de gestores de RCD y a la falta de infraestructura para su procesamiento, transporte y disposición.

Figura 64. Evaluación de las deficiencias en la GRCD en el AMB.

Evaluación de las deficiencias en la GRCD en el AMB		
Etapa	Subproceso	Deficiencias Identificadas
Pre-construcción	Demolición	*Falta de control y registro de residuos *Ausencia de documentación del destino y aprovechamiento *Inexistencia de demolición selectiva
	Excavación (descapote, cimentación, pilotaje)	*Registro insuficiente de la cantidad de residuos *Carencia de alternativas de reutilización *Falta de documentación de malas prácticas
Construcción	Acabados	*Generación de residuos diversos y peligrosos sin manejo adecuado *Procesos de recolección y disposición ineficientes
	Estructura	*Separación inadecuada en la fuente *Clasificación incorrecta de residuos *Aumento de costos por disposición inadecuada *Falta de control en el registro de cantidad y destino *Escasez de gestores autorizados
	Instalaciones	*Complejidad de RCD dificulta la disposición *Procesos de recolección y disposición ineficientes
	Obra gris	*Separación inadecuada en la fuente *Control y registro deficiente de residuos *Ausencia de gestores para materiales específicos *Aumento de costos por disposición inadecuada *Falta de registro riguroso de malas prácticas

Adaptado de [43].

6.2.1.1 Razones de la Escasez de Gestores de RCD en el AMB. Este apartado busca analizar las causas de la escasez de gestores de RCD en el AMB, explorando factores económicos, sociales, ambientales y otros posibles escenarios que contribuyen a esta situación.

6.2.1.1.1 Falta de incentivos económicos y barreras de inversión. En el ámbito económico, la creación de empresas gestoras de RCD en el AMB enfrenta una baja

rentabilidad debido a los altos costos operativos y la falta de apoyo financiero [43]. Esta situación se agrava por la ausencia de políticas claras que ofrezcan beneficios fiscales o subsidios para fomentar la inversión en infraestructura de reciclaje y valorización de RCD [43].

Además, la implementación de plantas de tratamiento requiere equipos especializados, terrenos adecuados y permisos ambientales, lo que dificulta el acceso a financiamiento para nuevos gestores [41]. Otra barrera significativa es la falta de una demanda consolidada en el sector constructivo para el uso de RCD, lo que limita la generación de ingresos sostenibles para las empresas gestoras [43].

Asimismo, la alta disponibilidad y bajos costos de materiales naturales como granito, mármol, caliza, arenisca, arena y grava reducen el interés del sector constructor en el uso de AR, afectando la viabilidad económica de las empresas gestoras [41]. La falta de subsidios e incentivos fiscales sigue siendo un obstáculo para la inversión en infraestructura de gestión de RCD [5].

6.2.1.1.2 Deficiencias en cumplimiento de normativas y falta de una regulación efectiva para gestores. A pesar de la existencia de normativas como la Resolución 1257 de 2021 y la Resolución 0754 de 2014, su cumplimiento en el AMB no es riguroso, lo que permite que muchas empresas dispongan RCD de manera inadecuada sin recibir sanciones [31]. Además, se evidenció la falta de un sistema de monitoreo eficiente para identificar gestores informales o ilegales, lo que afecta la transparencia en la gestión de RCD [43].

6.2.1.1.3 Falta de educación y sensibilización en el sector construcción para atraer gestores. En este apartado se analizó bibliografía que indica que muchas empresas

del sector constructivo en el AMB desconocen los beneficios de trabajar con gestores certificados [43]. Además, se revisaron estudios de otras partes del mundo que explican posibles causas de esta situación y cómo podrían aplicarse al contexto del AMB. Según [48], una de las razones es la falta de programas educativos para la formación de nuevos gestores de RCD en normatividad, tecnologías de reciclaje y economía circular. Asimismo, esto también puede deberse a la baja cultura de separación en la fuente, lo que dificulta el trabajo de los gestores al recibir residuos mezclados, incrementando los costos de procesamiento [38].

6.2.2 Deficiencias en la implementación de normativas y trámites administrativos en la GRCD en el AMB

Las normativas que rigen la GRCD en el AMB son exhaustivas en cuanto a la minimización del impacto ambiental y el fomento del aprovechamiento de RCD. Estas normas se aplican a todas las personas, tanto naturales como jurídicas, involucradas en la generación, recolección, transporte, almacenamiento, aprovechamiento o disposición de RCD en el territorio nacional.

La normativa detalla cada aspecto del manejo de RCD, estableciendo obligaciones claras para cada actor, definiendo programas de manejo ambiental, asignando roles a las autoridades ambientales y promoviendo la simbiosis industrial. No obstante, la implementación efectiva de estas normativas presenta deficiencias debido a la falta de monitoreo y control por parte de la administración de las entidades ambientales.

El PGIRS identificó más de 111 puntos críticos de disposición ilegal de RCD en el AMB, evidenciando deficiencias en la aplicación de la normativa [43]. Asimismo, se observó una falta de incentivos para la participación de constructoras y recicladores en la gestión y

aprovechamiento de los RCD [43]. Por lo tanto, se requiere un compromiso conjunto de gestores, constructoras y recicladores para lograr una gestión integral y efectiva de estos residuos.

6.2.3 Impactos económicos

Se evidenció que la ineficiencia en la GRCD genera altos costos de transporte y disposición final, afectando el presupuesto de los proyectos de construcción [43]. Además, la falta de una demanda consolidada para AR de alta calidad desincentiva la inversión en plantas de reciclaje [46]. Asimismo, la baja inversión en tecnologías innovadoras compromete la rentabilidad del sector [46].

6.2.4 Impactos sociales

En el ámbito social, se analizó que la contaminación por disposición ilegal de RCD en el AMB afecta la calidad de vida en sectores urbanos y periféricos [43]. Se destaca la participación de trabajadores informales en la gestión de RCD sin garantías laborales ni condiciones adecuadas [43]. Se propone vincularlos a empresas gestoras de RCD, aprovechando su conocimiento para fortalecer la GRCD. La falta de educación ambiental y sensibilización ciudadana dificulta la cultura de separación y reciclaje en las obras [46].

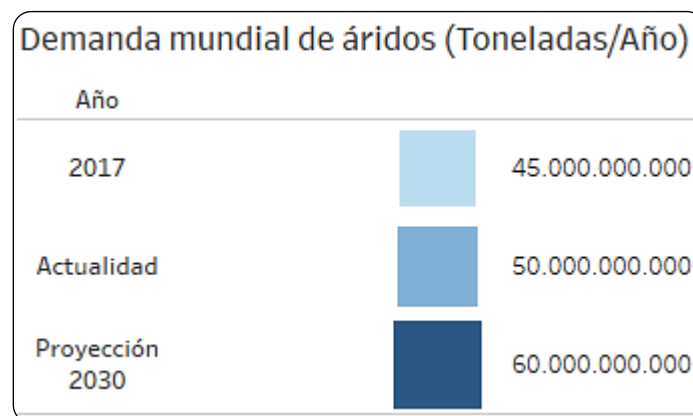
6.2.5 Impactos ambientales

En el AMB, el análisis revela que la disposición inadecuada de RCD ha generado una significativa contaminación de cuerpos hídricos y suelos [43]. Esta contaminación se manifiesta en la alteración de parámetros fisicoquímicos, incluyendo variaciones en el pH de fuentes hídricas, atribuibles a la lixiviación de contaminantes presentes en los RCD, tales

como compuestos orgánicos volátiles, metales pesados y otros químicos provenientes de pinturas, selladores y materiales de construcción.

Aunque la literatura específica sobre la extracción de materiales vírgenes en el AMB es limitada, es relevante considerar el marco de referencia proporcionado por el autor [48]. En contextos como Australia, Europa, Hong Kong y el Reino Unido, la persistencia de la extracción de materiales vírgenes se correlaciona con tasas insuficientes de reciclaje de residuos pétreos y materiales de excavación RCD. Es probable que algo similar esté sucediendo en el AMB, dada la falta de infraestructura óptima que tiene actualmente el AMB para el procesamiento y valorización de RCD. Cabe resaltar que la demanda mundial de materiales vírgenes de áridos aumenta año tras año (ver Fig.65), lo que representa una señal de alerta para la implementación de AR de alta calidad, reduciendo así la extracción en fuentes naturales.

Figura 65. Demanda mundial de áridos (Toneladas/Año).



Adaptado de [6].

Adicionalmente, se identifica una falta de información respecto a las mediciones de emisiones de gases de efecto invernadero y la evaluación de la huella ambiental asociada a

la GRCD en el AMB. Esta carencia de datos específicos, también observada algunas regiones como Dinamarca, Alemania, Reino Unido, Finlandia y Alemania [7] donde impide una evaluación precisa del impacto ambiental global de la GRCD en el contexto local.

6.3 Acciones viables para la GRCD en el AMB

A continuación, se muestran las acciones viables para el aumento de gestores en el AMB y responder la problemática y los objetivos planteados, estas acciones no pretenden reemplazar el modelo actual de GRCD, sino fortalecerlo y optimizarlo. El objetivo es apoyar la gestión existente mediante estrategias que mejoren la infraestructura, fomenten la formalización de gestores y promuevan un aprovechamiento más eficiente de los RCD. Estas propuestas buscan complementar el sistema actual, impulsando su desarrollo mediante mejoras progresivas y sostenibles, sin requerir cambios radicales.

Figura 66. Cuadro de evaluación del desempeño de los productos del proyecto.

Cuadro de evaluación del desempeño de los productos del proyecto		
Objetivo Relacionado	Indicador	Resultado
OBJETIVO GENERAL Analizar metodologías de GRCD innovadoras y eficientes para sugerir un modelo de gestión integral en el AMB.	Comparación de métodos actuales y recientes en la gestión de RCD.	Análisis de metodologías innovadoras para la gestión de RCD en el AMB
OBJETIVO ESPECIFICO 1 Determinar las razones generadoras de la escasez de gestores de RCD en el AMB y definir acciones viables para su aumento.	Cantidad de gestores certificados en el AMB, puntos de disposición ilegal y porcentaje de aprovechamiento de RCD.	Identificación de deficiencias en la gestión actual de RCD en el AMB
	Cantidad de incentivos económicos y normativas propuestas para fomentar la formalización de gestores.	Propuesta de estrategias para incrementar gestores de RCD
OBJETIVO ESPECIFICO 2 Identificar los métodos actuales de administración en la GRCD en el AMB y contrastarlos con los métodos más recientes en otros países, con un enfoque en el aprovechamiento de AR de alta calidad.	Aplicabilidad de metodologías extranjeras en el AMB (BIM, IA, economía circular, normativas, etc.).	Comparación de métodos de administración de RCD en el AMB con modelos internacionales
	Propuesta de aplicación de herramientas digitales y estrategias de aprovechamiento de RCD.	Recomendaciones para mejorar la gestión de RCD en el AMB
OBJETIVO ESPECIFICO 3 Establecer la importancia de la gestión eficiente de RCD por parte de las entidades responsables para demostrar los beneficios económicos, ambientales y sociales del AMB.	Número de nuevas plantas de tratamiento recomendadas y estrategias en la aplicación de las normativas para fortalecer el marco regulador.	Desarrollo de estrategias para fortalecer la infraestructura y la implementación de las normativas en la GRCD del AMB
	Reducción de costos de disposición, disminución de impactos ambientales y mejoras en la planificación de infraestructura.	Evaluación de los beneficios económicos, ambientales y sociales de la gestión eficiente de RCD

6.3.1 Hallazgos relevantes

Se evidenció que la descentralización de plantas de valorización y la optimización del transporte de RCD mejoran la gestión de residuos y reducen costos logísticos [5, 38]. En el AMB, la disposición principal en Proyectos e Inversiones El Parque S.A. genera altos costos de transporte [41]. Se propuso implementar plantas de valorización descentralizadas y promover incentivos para el transporte sostenible [43]. Adicionalmente, se planteó una estrategia integral con el método BIM para estimación precisa de RCD, planificación anticipada, estadísticas detalladas y optimización de AR. Considerando la generación de

571.802 toneladas de RCD en 2019, los espacios disponibles (Predio de la antigua ladrillera Bucaramanga y Predio Cemex) y la normativa [31], se determinó la viabilidad de instalar entre tres y cinco nuevas plantas de tratamiento, siguiendo el modelo de GRECO en Cota, Cundinamarca.

Figura 67. Cuadro de impacto del proyecto en diferentes aspectos.

Cuadro de impacto del proyecto en diferentes aspectos		
Aspecto	Impacto	Plazo
Ambiental	Disminución de la explotación de canteras mediante la implementación de AR de alta calidad en la construcción.	Largo (5-10 años)
	Implementación de tecnologías para la clasificación y reciclaje eficiente de RCD, disminuyendo la contaminación por residuos de construcción.	Largo (5-10 años)
	Reducción de la disposición ilegal de RCD al fortalecer la infraestructura y los mecanismos de control.	Mediano (3-5 años)
Económico	Generación de empleo formal mediante la vinculación de recicladores informales al sistema de GRCD.	Corto (1-3 años)
	Mayor rentabilidad para gestores de RCD con incentivos financieros y un mercado más sólido de AR de alta calidad.	Largo (5-10 años)
	Reducción de costos de transporte y disposición de RCD mediante la descentralización de plantas de valorización.	Mediano (3-5 años)
Infraestructura	Creación de nuevas plantas de tratamiento y puntos de acopio estratégicos en el AMB para optimizar la gestión de RCD.	Mediano (3-5 años)
	Reducción de la distancia y costos de transporte mediante la descentralización del procesamiento de RCD.	Mediano (3-5 años)
Normativo	Creación de incentivos fiscales y subsidios para empresas que promuevan el reciclaje y reutilización de materiales de construcción.	Mediano (3-5 años)
	Fortalecimiento del cumplimiento de normativas mediante un sistema de monitoreo eficiente para la trazabilidad de RCD.	Corto (1-3 años)
Social	Fomento de la cultura de separación en la fuente y sensibilización ciudadana sobre la gestión de RCD.	Corto (1-3 años)
	Inclusión de trabajadores informales en la gestión de RCD con garantías laborales y condiciones adecuadas.	Corto (1-3 años)
	Mejora de la calidad de vida en zonas urbanas y periféricas al reducir la contaminación por disposición inadecuada de RCD.	Mediano (3-5 años)

- Reducción de impacto económico: la aplicación de plantas móviles de reciclaje podría reducir los costos de transporte y disposición de RCD en un 40% [34].
- Reducción impacto ambiental: la implementación de sistemas de GPS y vigilancia rigurosa en camiones de transporte de RCD se proyecta que disminuiría la disposición ilegal en un 30%, según lo demostrado en Shenzhen, China [50], por lo tanto, para el

AMB esto podría ser de gran beneficio para la GRCD en temas de impacto ambiental y de gestión.

Figura 68. *Importancia de la gestión eficiente de RCD en el AMB.*

Importancia de la gestión eficiente de RCD en el AMB		
Beneficio	Explicación	Referencia
Ambiental	Un adecuado manejo de RCD reduce la cantidad de residuos dispuestos en escombreras, minimizando impactos como contaminación del suelo y cuerpos de agua. Se sugiere la implementación de tecnologías para mejorar la trazabilidad y aprovechamiento de residuos.	(Swiss Contact & Embassy of Switzerland in Colombia, 2019)
Económico	La implementación de un sistema eficiente de gestión de RCD permite reducir costos de disposición final, fomenta la creación de empleos en el sector del reciclaje y fortalece el mercado de agregados reciclados. Se propone incentivar con beneficios fiscales y subsidios a empresas que adopten estas prácticas.	(Swiss Contact & Embassy of Switzerland in Colombia, 2019)
Infraestructura	Se recomienda la creación de nuevos puntos de acopio y plantas de reciclaje para optimizar el proceso de gestión de RCD. También se sugiere mejorar la supervisión del transporte y disposición de residuos mediante sistemas de monitoreo GPS.	(Santander Competitivo PGIRS AMB, 2022)
Social	El aprovechamiento de RCD fomenta la economía circular, reduciendo la explotación de canteras y promoviendo la reutilización de materiales. Además, disminuye los impactos negativos de la disposición ilegal de escombros en espacios urbanos y rurales.	(Swiss Contact & Embassy of Switzerland en Colombia, 2019)

6.3.2 Hallazgos importantes

Aplicación del Método BIM-CDW Info Model en el AMB: El Método BIM-CDW Info Model, aplicado en Brasil y Portugal [1], permite la estimación de RCD in situ antes de realizar una demolición. Este modelo se basa en la integración de BIM para cuantificar los residuos generados y planificar su gestión eficiente.

Para el AMB, se propone la implementación de un método que, mediante un estudio BIM detallado previo a la demolición, permita la estimación precisa de RCD, la planificación anticipada de su gestión, la obtención de estadísticas detalladas sobre su cantidad y tipo, y la

optimización del aprovechamiento de AR de alta calidad mediante su clasificación previa. Esta estrategia busca mejorar la trazabilidad y eficiencia en la GRCD para así poder ingresar a un mercado de economía circular que sea viable, alineándose con los modelos internacionales de gestión sostenible de RCD.

Para abordar estos desafíos, se proponen acciones viables donde se muestra un modelo de gestión integral, las cuales están detalladas en el siguiente cuadro, donde se presentan sugerencias basadas en los autores y métodos investigados, con sus respectivas referencias. Estas propuestas están diseñadas para integrarse al modelo actual de GRCD en el AMB, permitiendo mitigar de manera efectiva las causas de la escasez de gestores y otros desafíos identificados.

Figura 69. Acciones viables para mitigar los desafíos encontrados en la GRCD en el AMB (primera parte).

Acciones viables para mitigar los desafíos encontrados en la GRCD en el AMB	
Desafíos en la GRCD en el AMB	Acciones viables para su solución según metodologías investigadas
Deficiencias en cumplimiento de normativas y falta de regulación efectiva 📄 La falta de control permite la disposición inadecuada de RCD sin sanciones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).	*Fortalecer normativas que exijan el uso de materiales reciclados en la construcción, promoviendo la economía circular (Cristiano et al., 2021; Huang et al., 2018). *Implementar una plataforma digital de registro para monitorear gestores de RCD en tiempo real (Swiss Contact & Embassy of Switzerland en Colombia, 2019).
Falta de educación y sensibilización en el sector construcción 🧑‍🔧 Muchas empresas desconocen los beneficios de trabajar con gestores certificados (Swiss Contact & Embassy of Switzerland en Colombia, 2019).	*Capacitar a los trabajadores de la construcción en prácticas de separación y reciclaje de RCD (Islam et al., 2019). *Desarrollar programas de capacitación técnica para nuevos gestores, incluyendo normatividad y tecnologías de reciclaje (Swiss Contact & Embassy of Switzerland en Colombia, 2019). *Promover la cooperación entre empresas, universidades y el gobierno para desarrollar nuevas tecnologías de reciclaje y valorización de RCD (Ding, Wang y Zou, 2023).
Falta de incentivos económicos y barreras de inversión 💰 Altos costos operativos y falta de apoyo financiero limitan la creación de nuevos gestores (Swiss Contact & Embassy of Switzerland en Colombia, 2019).	*Crear un fondo de inversión público-privado para fomentar nuevas plantas de reciclaje de RCD (Swiss Contact & Embassy of Switzerland en Colombia, 2019). *Incluir incentivos financieros para la investigación y desarrollo de tecnologías de reciclaje, promoviendo becas y apoyo a proyectos innovadores (Huang et al., 2018). *Otorgar subsidios, reducción de impuestos y créditos con tasas bajas a empresas del sector (Huang et al., 2018; Ding, Wang y Zou, 2023). *Reducir costos de arriendo de terrenos para plantas de RCD, promoviendo nuevas inversiones (Huang et al., 2018).

Figura 70. Acciones viables para mitigar los desafíos encontrados en la GRCD en el AMB (segunda parte).

Acciones viables para mitigar los desafíos encontrados en la GRCD en el AMB	
Desafíos en la GRCD en el AMB	Acciones viables para su solución según metodologías investigadas
<p>Falta de planificación estratégica y herramientas digitales para la gestión de RCD 📅 No se aprovechan tecnologías avanzadas para mejorar la gestión de residuos (Cristiano et al., 2021).</p>	*Aplicar BIM para la gestión de RCD, facilitando su cuantificación, clasificación y valorización desde la fase de diseño (BIM-CDW Info Model, 2024).
	*Automatizar el procesamiento de datos de RCD, integrando herramientas como Jupyter Notebook, IfcOpenShell y Python para monitoreo en tiempo real (BIM-CDW Info Model, 2024).
	*Implementar plataformas digitales para la planificación de infraestructura y seguimiento de residuos, asegurando la trazabilidad de los materiales reciclados (Cristiano et al., 2021).
	*Integrar robots autónomos en la clasificación de RCD, mejorando la eficiencia y reduciendo costos laborales, para las cintas transportadoras de RCD en la plantas móviles (Demetriou et al., 2023, 2024; Dodamegama et al., 2024).
<p>Problemas logísticos y falta de infraestructura 🚚 La falta de puntos de acopio y la lejanía de los sitios de disposición encarecen el transporte de RCD (Santander Competitivo PGIRS AMB, 2022).</p>	*Construir puntos de acopio en cada municipio del AMB para reducir costos de transporte (Santander Competitivo PGIRS AMB, 2022).
	*Construir una cadena industrial de circuito cerrado, optimizando el reciclaje y promoviendo la simbiosis industrial entre generadores y gestores de RCD (Ding, Wang y Zou, 2023).
	*Implementar IA y robótica en cintas transportadoras de plantas de reciclaje, optimizando la clasificación de RCD (Demetriou et al., 2023, 2024).
	*Monitorear el transporte de RCD con GPS, evitando su disposición ilegal (Huang et al., 2018).

7. Conclusiones

- ✓ La investigación permitió identificar que en el AMB se generaron 571.802 toneladas de RCD en 2019, mientras que solo existen 14 gestores registrados, lo que evidencia una oferta insuficiente para cubrir la demanda del sistema. Además, la centralización de la disposición en Proyectos e Inversiones El Parque S.A. implica recorridos largos, especialmente desde municipios como Piedecuesta y Girón, aumentando costos y dificultando la eficiencia de la GRCD. Se concluye que la descentralización de plantas de recolección y aprovechamiento facilitaría la operación de nuevos gestores y reduciría costos logísticos. La información sobre la generación y disposición de RCD fue accesible, pero hubo dificultades para obtener datos sobre gestores informales.

- ✓ En comparación con modelos internacionales, se evidenció que el AMB presenta deficiencias en el cumplimiento de normativas y operativas que limitan el aprovechamiento de RCD. Se identificó la metodología BIM-CDW Info Model (Brasil y Portugal), que permite estimaciones precisas en pre-construcción y construcción mediante modelado digital, así como el uso de inteligencia artificial (Chipre) para la clasificación automatizada de residuos. Además, el método 3R (China) propone incentivos regulatorios y de mercado para fomentar el reciclaje. La falta de información local sobre implementación de tecnologías avanzadas en la GRCD representó un desafío para el análisis comparativo.

- ✓ Se demostró la importancia de mejorar la gestión de RCD para optimizar beneficios económicos, ambientales y sociales. La inadecuada disposición de residuos ha generado 111 puntos críticos de contaminación en la región, afectando la calidad de vida y aumentando la degradación ambiental. En el ámbito económico, descentralizar plantas de valorización y establecer incentivos fiscales para el uso de materiales reciclados reduciría costos de transporte y fomentaría un mercado más rentable. Desde la perspectiva social, formalizar trabajadores informales dentro de empresas gestoras mejoraría sus condiciones laborales y fortalecería la inclusión en el sector. La integración de sensores IoT y software de gestión permitiría un monitoreo en tiempo real, optimizando la toma de decisiones en la GRCD del AMB. Los cálculos económicos y logísticos fueron complejos por la falta de datos unificados, lo que requirió estimaciones basadas en modelos internacionales.

- ✓ En general, la investigación cumplió con sus objetivos al evidenciar los desafíos de la GRCD en el AMB y proponer estrategias basadas en metodologías innovadoras. Sin embargo, se identificó una limitación en la disponibilidad de datos actualizados, lo que resalta la necesidad de mayor transparencia en la información sobre generación y gestión de RCD. A pesar de estas dificultades, los resultados obtenidos brindan una base sólida para futuras investigaciones y la posible implementación de estrategias más eficientes en la región.

8. Recomendaciones

- ✓ Es importante brindar apoyo a nuevos gestores a través de capacitaciones y acceso a financiamiento para que puedan operar de manera eficiente. Se recomienda crear incentivos económicos, como descuentos en trámites y créditos de bajo interés, además de fomentar alianzas con constructoras para garantizar la demanda de sus servicios.
- ✓ Se sugiere realizar pruebas piloto con tecnologías como BIM-CDW Info Model y sistemas de clasificación automatizada para evaluar su viabilidad en el AMB. También sería útil establecer convenios con universidades y expertos en el tema para facilitar la adopción de estas innovaciones.
- ✓ Para fortalecer la GRCD, se recomienda ofrecer incentivos fiscales a constructoras que usen materiales reciclados y mejorar la trazabilidad de los residuos con

herramientas digitales. Además, es clave formalizar a los recicladores informales a través de programas de capacitación y acceso a empleo estable en empresas gestoras.

Referencias

- [1]. N. Schamne, A. Nagalli, A. A. V. Soeiro, and J. P. da Silva Poças Martins, 'BIM in construction waste management: A conceptual model based on the industry foundation classes standard', *Automation in Construction*, vol. 159, p. 105283, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105283>.
- [2]. Nawaz, J. Chen, and X. Su, Exploring the trends in construction and demolition waste (C&DW) research: A scientometric analysis approach', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 55, p. 102953, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102953>.
- [3]. R. Ramzy, "China's mountains of construction rubble," *The New York Times*, oct. 20, 2013. [Online]. Available: <https://archive.nytimes.com/sinosphere.blogs.nytimes.com/2013/10/20/chinas-mountains-of-construction-rubble/>. [Accessed: Jan. 28, 2025].
- [4]. Canadian Standards Association, Green Globes System. 2012. [Online]. Available: <http://www.greenglobes.com/about.asp>.
- [5]. H. Huang, X. Wang, H. Kua, Y. Geng, R. Bleischwitz, and J. Ren, 'Construction and demolition waste management in China through the 3R principle', *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 129, pp. 36–44, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>.
- [6]. Y. Yang and J. Chen, "Robust design for a multi-echelon regional construction and demolition waste reverse logistics network based on decision maker's conservative attitude," *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 122909, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122909>.

- [7]. CIRCuIT Project, "Circular construction in regenerative cities: Insights from the CIRCuIT Project (Final Report)," Cities of Copenhagen, Hamburg, London, and the Vantaa/Helsinki region, 2019–2023. [Online]. Available: <https://circuit-project.eu/post/latest-circuit-reports-and-publications>.
- [8]. R. J. Cole and N. Larsson, Green Building Challenge-GBTool User Manual. 2002. [Online]. Available: http://www.iisbe.org/down/gbc2005/GBC2k2/GBC2k2_Manual_A4.pdf
- [9]. Concejo de Bucaramanga, Acuerdo No. 011 de 2014 - Plan de Ordenamiento Territorial 2014-2027, Bucaramanga, Colombia, 2014. [Online]. Available: <https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/POT-2014-2027.pdf>.
- [10]. Congreso de Colombia, "Bill 005 of 2010: Affirmative action's promoting the welfare of vulnerable informal recyclers," 2010. [Online]. Available: http://www.imprenta.gov.co/gacetap/gaceta.mostrar_documento?p_tipo=05&p_numero=005&p_consec=26209.
- [11]. Congreso de Colombia, "Law 9 of 1989: Regulations on municipal development plans, purchase and expropriation of goods, and other provisions," Diario Oficial No. 38.650, 1989.
- [12]. Congreso de Colombia, "Ley 1259 de 2008: Por medio de la cual se instaura en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones", 19 diciembre 2008. [Online]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=34388.

- [13]. Green Building Council of Australia, Green Star Environmental Assessment System. Sydney, Australia, 2012; vol. 2012.52. Building and Construction Authority-Government of Singapore. Green Mark Assessment System. 2012. [Online]. Available: http://bca.gov.sg/GreenMark/green_mark_criteria.html
- [14]. Consejo Nacional de Política Económica y Social, "Favorable concept for the nation to contract an external loan with multilateral banks up to US\$20 million to partially finance the solid waste disposal program," 2009. [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2009/conpes_3574_2009.pdf.
- [15]. P. Demetriou, P. Mavromatidis, M. F. Petrou, and D. Nicolaidis, "CODD: A benchmark dataset for the automated sorting of construction and demolition waste," *Waste Management*, vol. 178, pp. 35–45, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.017>.
- [16]. P. Demetriou, P. Mavromatidis, P. M. Robert, H. Papadopoulos, M. F. Petrou, and D. Nicolaidis, "Real-time construction demolition waste detection using state-of-the-art deep learning methods; single-stage vs two-stage detectors," *Waste Management*, vol. 167, pp. 194–203, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.039>.
- [17]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Population projections. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.
- [18]. CEPAL, "El 50,8% de la población de América Latina está en la fuerza laboral," Mar. 2024. [Online]. Available: <https://acortar.link/1t232f>

- [19]. Eurostat, "Breakdown of total waste generation by waste category: EU 27 generation indicator coverage, 2010," Eurostat, Luxembourg, 2014. [Online]. Available: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do>.
- [20]. Granulados Recicladados de Colombia. [Online]. Available: https://recicladadosgreco.com/wp-content/uploads/2024/04/Home2_7_11zon.webp. [Accessed: 11-Feb-2025].
- [21]. H. D. Arévalo Rodríguez, "Analysis of construction and demolition waste management in the residential sector in the AMB through the 3R principle," Undergraduate Thesis, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, 2021.
- [22]. Hyder Consulting, "State of construction and demolition waste: Management of construction and demolition waste in Australia," Hyder Consulting, Melbourne, Australia, 2011.
- [23]. Reichert and E. Linß, 'Water content estimation of recycled building materials based on near-infrared spectroscopy', *Construction and Building Materials*, vol. 412, p. 134827, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134827>.
- [24]. J. D. Mora Castro, "Recycling and reuse of construction materials in Colombia as a contribution to the circular economy," Universidad de La Salle, 2021. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/971.
- [25]. J. García Vega, "Primer foro para la gestión de los residuos de construcción y demolición. Programa basuras cero," CEMEX COLOMBIA, Bogotá, 2016.
- [26]. K. Zhang, Q. Ye, Q. Umer, and F. Asmi, "How construction and demolition waste management has addressed sustainable development goals: Exploring academic and

- industrial trends," *Journal of Environmental Management*, vol. 345, p. 118823, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118823>.
- [27]. L. Bogoviku and D. Waldmann, 'Modelling of mineral construction and demolition waste dynamics through a combination of geospatial and image analysis', *Journal of Environmental Management*, vol. 282, p. 111879, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111879>.
- [28]. L. Olarte Betancourt, "Utilization of construction and demolition waste (RCD) to boost road network development in Colombia," Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2021. [Online]. Available: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/39331/OlarteBetancourtLauraValentina,2021.pdf>.
- [29]. Maat Soluciones Ambientales, "Gestión integral de residuos de construcción y demolición," 2025. [Online]. Available: <https://www.maat.com.co/>. [Accessed: 11-Feb-2025].
- [30]. Building Research Establishment, *Método de evaluación ambiental del Building Research Establishment*. 2008. [Online]. Available: <http://www.bre.co.uk>
- [31]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 0472 de 2017," oct. 29, 2021. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0472-de-2017/>.
- [32]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 1257 de 2021," Dec. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1257-de-2021/>.
- [33]. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución N° 0754 de 2014: Por la cual se adopta la metodología para

- la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos", 2014. [Online]. Available: <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-08/resolucion-754-de-2014.pdf>
- [34]. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS 2016–2027: Contrato N° 386 de 2015, 2015. [Online]. Available: https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/PLAN_DE_GeSTION_INTEGRAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_BUCARAMANGA_2016-2027.pdf.
- [35]. R. Islam, T. H. Nazifa, A. Yuniarto, A. S. M. Shanawaz Uddin, S. Salmiati, and S. Shahid, 'An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling', *Waste Management*, vol. 95, pp. 10–21, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.049>.
- [36]. R. V. Silva and R. K. Dhir, "Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 598–614, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>.
- [37]. R. V. Silva and R. K. Dhir, "Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 236, p. 117629, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>.
- [38]. S. Cristiano et al., 'Construction and demolition waste in the Metropolitan City of Naples, Italy: State of the art, circular design, and sustainable planning opportunities',

- Journal of Cleaner Production, vol. 293, p. 125856, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125856>.
- [39]. S. Dodampegama, L. Hou, E. Asadi, G. Zhang, and S. Setunge, Revolutionizing construction and demolition waste sorting: Insights from artificial intelligence and robotic applications', Resources, Conservation and Recycling, vol. 202, p. 107375, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107375>.
- [40]. S. Marín-Cortés, M. Fernández-Álvarez, A. Moure, J. F. Fernández, and E. Enríquez, 'Chemometric-driven quantification of construction and demolition waste using Raman spectroscopy and SWIR: Enhancing sustainability in the ceramic sector', Resources, Conservation and Recycling, vol. 199, p. 107259, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107259>.
- [41]. Santander Competitivo - Regional Competitiveness Commission of Santander, Santander Competitivo. [Online]. Available: <https://santandercompetitivo.org/biblioteca-de-documentos/competitividad-en-santander/plan-de-gestin-integral-de-residuos-slidos-pgirs-bucaramanga-2022-2033pdf/GIRS%20ACTUALIZADO%20FINAL>.
- [42]. HK-BEAM Society. HK-BEAM. 2007. [Online]. Available: https://www.hkgbc.org.hk/eng/BEAMPlus_NBEB.aspx
- [43]. Swiss Contact and Embassy of Switzerland in Colombia, "Circular economy and life cycle approach in construction and demolition waste management (RCD): Sustainable construction project and circular economy to boost the construction value chain in Santander," Cluster de Construcción, 2019. [Online]. Available: <https://www.colombiamascompetitiva.com/wp->

content/uploads/2020/07/CONSTRUCCIO%CC%81N-ECONOMIA-CIRCULAR.pdf.

- [44]. U.S. Green Building Council. Leadership in Energy and Environmental Design. 2008. [Online]. Available: <http://www.usgbc.org>
- [45]. United States Environmental Protection Agency, Construction and demolition waste. New York, NY, USA, 2009.
- [46]. Universidad Industrial de Santander, Unidad de Planeación Minero-Energética, "Realizar un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo el enfoque de economía circular," Documento de Análisis Nacional, Bucaramanga, Colombia, nov. 2018. [Online]. Available: <https://www.andi.com.co/Uploads/Documento%20An%C3%A1lisis%20Nacional.pdf>.
- [47]. World Bank. Urban Development: Overview. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview>.
- [48]. V. W. Y. Tam and W. Lu, "Profiles, practices, and performance of construction waste management: A cross-jurisdictional analysis in four countries," Sustainability, vol. 8, no. 2, pp. 190–205, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su8020190>.
- [49]. Eurostat, Waste generation statistics 2020 European Union countries, Jan. 2023. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation. [Accessed: jul. 4, 2024].
- [50]. Z. Ding, X. Wang, and P. X. Zou, "Barriers and countermeasures of construction and demolition waste recycling enterprises under circular economy," Journal of Cleaner

Production, vol. 420, p. 138235, 2023. [Online]. Available:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138235>.

- [51]. Z. Tag der Architektur und Ingenieurbaukunst in Hamburg Einfach (um)bauen. (s. f.). [Online]. Available: <https://www.tda-hamburg.de/>. https://www.tda-hamburg.de/fileadmin/processed/5/2/csm_523_9c3e8b-03-06-2024-523_e65280-14-03-2024-Visualisierung_Hof_Jonas-Bloch_b50113e38e.png.

Apéndices

Apéndice A. Utilizar mapas para extraer datos geográficos de demolición. (Paso 1 del método).

a) Utilizar mapas para extraer datos geográficos de demolición

Puede funcionar en ciudades que no tengan un registro de edificios. Utiliza mapas de distintos momentos para identificar los edificios demolidos analizando sus huellas. Los mapas pueden ofrecer una visión general de los próximos derribos y permitir una demanda específica de transformación a través de la planificación urbana.

Pasos clave

1. Adquiera al menos dos mapas de la ciudad que muestren la ubicación desde distintos puntos en el tiempo, con al menos cinco años de diferencia.
2. Superponga los mapas en un sistema de información geográfica (SIG) o por otros medios.
3. Compare las huellas de los edificios manualmente o mediante programas informáticos para detectar cambios.
4. Analizar las huellas modificadas para identificar si indican demolición u otra cosa (como la ampliación de un edificio).
5. Utilizar datos adicionales (por ejemplo, Google Street View) para identificar las características clave de los edificios demolidos, como la función y la altura/número de plantas.
6. Comparar las características clave, incluida la ubicación, con las nuevas construcciones para identificar oportunidades de conservación. Esto puede incluir la demolición y construcción de edificios similares o la demolición de edificios con potencial de reutilización adaptativa.
7. Analizar los edificios existentes en busca de las características clave de los edificios demolidos para identificar los que corren el riesgo de ser demolidos en el futuro.

Adaptado de [7].

Apéndice B. Utilizar un registro de edificios para analizar las pautas de sustitución. (Paso 2 del método).

b) Utilizar un registro de edificios para analizar las pautas de sustitución

Esto se recomienda para las ciudades con un registro de edificios que conserve información sobre los edificios demolidos. Además de un simple análisis del registro, las ciudades con registros que contengan información sobre la ubicación de los edificios (por ejemplo, coordenadas) pueden complementar el análisis sobre demoliciones y otros patrones del parque inmobiliario con un análisis geográfico similar al primer enfoque. Un registro de edificios geocodificable puede acelerar sustancialmente el análisis, ya que puede contener características clave de los edificios, como la función, la superficie útil, la altura, el número de plantas o el año de construcción.

Pasos clave

1. Obtenga acceso al registro del edificio o un extracto del mismo.
2. Realizar un sencillo análisis estadístico descriptivo de los edificios demolidos y construidos, destacando sus cantidades y características clave.
3. Comparar las características clave de los dos parques para identificar similitudes y diferencias en (por ejemplo) funciones o tamaños de los edificios demolidos y nuevos.
4. Si el registro es geocodificable, transfiera la información del registro al SIG para analizar las ubicaciones de los edificios demolidos y nuevos con el fin de identificar la aparición simultánea en los mismos barrios o parcelas (como sustitución).
5. Utilizando el mismo enfoque, analizar el parque de edificios existente en busca de las características clave de los edificios demolidos para identificar los edificios en riesgo de futura demolición.

Este enfoque es adecuado para las ciudades que no llevan un registro de los edificios demolidos y son demasiado extensas para analizarlas con mapas. Si la ciudad dispone de una base de datos de texto no indexada sobre permisos de construcción y/o planificación, busque "demolición" en el texto de la base de datos.

Pasos clave

1. Obtenga acceso a la base de datos de permisos de ciudad, o un extracto de la misma.
2. Busque en la base de datos los términos que le interesen (por ejemplo, "demolición", "deconstrucción", "sustitución", etc.).
3. Analizar los permisos identificados en busca de características clave de los edificios demolidos, como ubicación, función, superficie útil, año de construcción, etc.

Adaptado de [7].

Apéndice C. Análisis de los factores de localización. (Paso 3 del método).

Análisis de los factores de localización

Complementar el método uno con un análisis más detallado de los factores a nivel de barrio, como el acceso al transporte, las instalaciones y los servicios, puede ayudar a identificar las características urbanas que contribuyen a la demolición.

Paso clave

1. Determinar dónde se han llevado a cabo demoliciones en la ciudad durante un periodo determinado (como se indica en el método uno).
2. Recopilar datos sobre los factores de ubicación que podrían influir en el aumento o la disminución del riesgo de demolición de un edificio. Estos factores podrían ser:
 - acceso al transporte (proximidad a autopistas, transporte público, aeropuertos, etc.)
 - distancia y calidad de las instalaciones y servicios
 - características históricas y arquitectónicas
 - seguridad
 - uso del suelo
 - valor del suelo y de la propiedad
 - zonas de planificación y potencial de recalificación
 - densidad de ocupación

Compare geográficamente sus datos de actividad de demolición con los datos de localización para identificar tendencias comunes. Por ejemplo, que un alto porcentaje de demoliciones en los últimos cinco años haya tenido lugar en zonas con malas conexiones de transporte o con problemas concretos en un barrio.

Adaptado de [7].

Apéndice D. Analizar las perspectivas de las principales partes interesadas. (Paso 4 del método).

Analizar las perspectivas de las principales partes interesadas

Puede ser útil comprender cómo funciona el sector inmobiliario y de la construcción, cómo ven los principales interesados la conservación de edificios y qué factores son importantes para ellos a la hora de tomar decisiones de demolición. También puede complementar cualquier dato disponible sobre edificios y/o urbanismo.

Pasos clave

1. Hable con colegas u otros profesionales de la planificación para entender cómo se toman las decisiones urbanísticas en torno a la reurbanización y la demolición. Decisiones tomadas de las partes interesadas del entorno construido pueden influir en gran medida en la transformación o demolición de un edificio.
2. Realizar entrevistas y talleres con las partes interesadas para debatir los factores más influyentes.

Las preguntas podrían incluir:

- ¿Cuáles son los factores clave que guían las decisiones de demolición o rehabilitación?
- ¿Qué supuestos incluyen sus análisis de costes a corto y largo plazo?
- ¿Se incluye en sus el impacto sobre el valor social y las comunidades?
- ¿Qué (o quién) podría cambiar una decisión de demolición o rehabilitación? Por ejemplo, incentivos fiscales, requisitos legislativos, mejora de la orientación, desarrollo tecnológico, contexto del emplazamiento (ubicación, tipo de edificio).
- ¿Tiene alguna idea de cómo se ha planteado la decisión de renovar o demoler en los proyectos existentes? ¿Existen estudios de casos?

3. Los estudios de mercado sobre las tendencias actuales y futuras del entorno construido podrían ayudar a identificar los tipos de edificios o zonas que corren el riesgo de quedarse obsoletos ahora y en el futuro. Los debates con las partes interesadas del sector de la construcción pueden arrojar luz sobre estos temas. Además, se pueden consultar informes y artículos sobre temas relevantes.

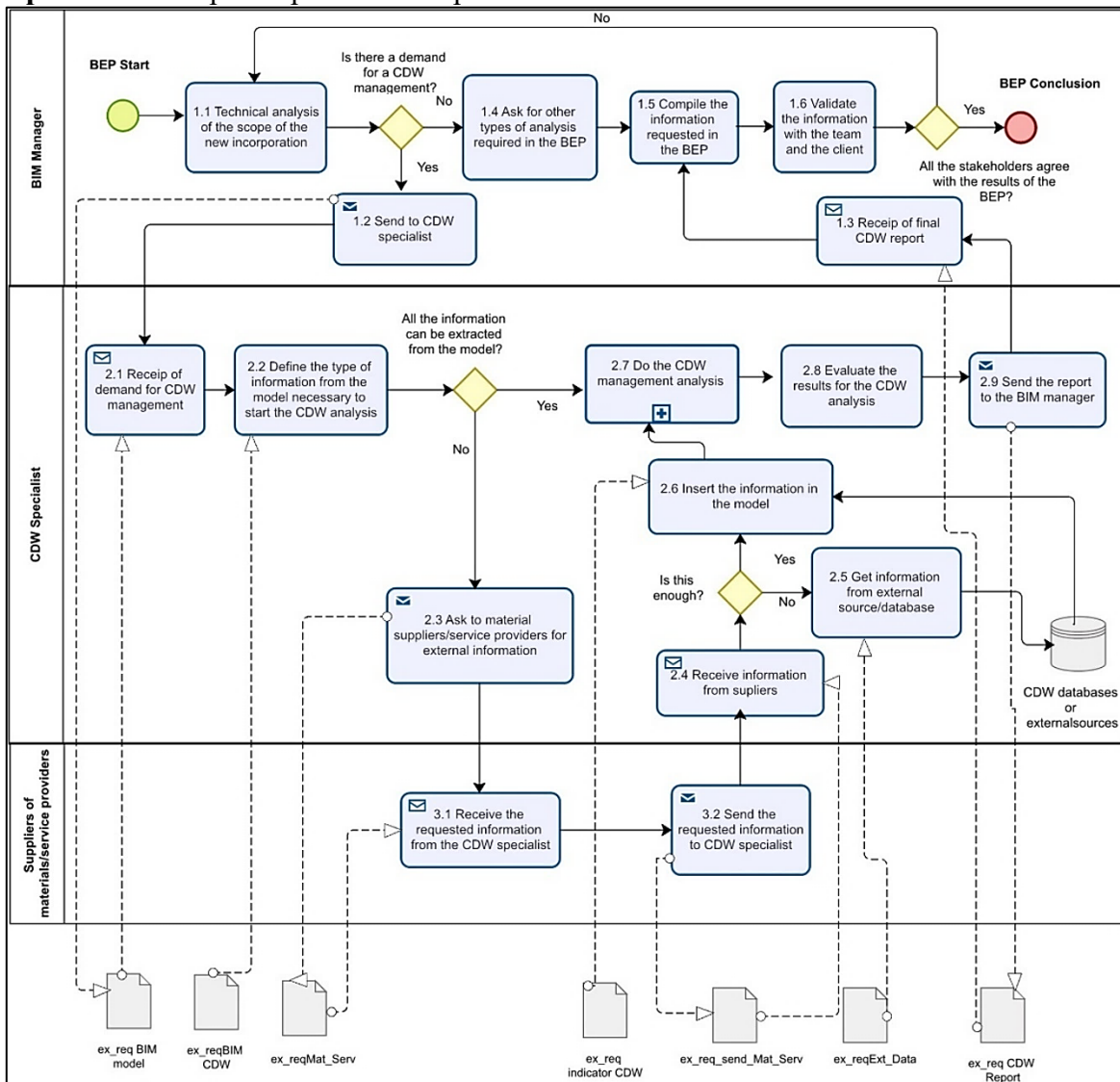
Adaptado de [7].

Apéndice E. Entrevistas realizadas sobre la GRCD

Entrevistas realizadas sobre la GRCD		
Grupo	Pregunta	Respuesta
Empresas de construcción	P2: ¿Utiliza materiales reciclados producidos por RCD en el nuevo edificio? En caso negativo, ¿por qué?	Rara vez. El precio de los materiales de construcción reciclados no es atractivo. Además, no se puede garantizar su calidad, ya que no existe ninguna norma para los materiales de construcción reciclados.
Empresas de demolición	P3: ¿Separa los RCD in situ tras la demolición?	Por lo general, sólo se recogen in situ chatarra de acero, puertas y ventanas y ladrillos, mientras que la mayoría de los RCD generados se transportan a lugares designados para su eliminación.
Empresas de diseño de edificios	P1: ¿Existe algún tipo de formación u orientación que le lleve a considerar la reducción de RCD durante su trabajo de diseño de edificios?	No hay formación ni orientación.
Empresas de tratamiento de RCD	P1: ¿Están bien clasificados los RCD que ha recogido?	No. La mayoría son mixtos. Tenemos que pagar mucho esfuerzo y coste para clasificarlos.
	P2: ¿Cuál es la mayor dificultad en el funcionamiento de su empresa? ¿Por qué?	Un gran reto es el suministro estable de RCD. Sólo con un estricto control gubernamental y un mercado maduro de reciclaje de RCD se puede asegurar el suministro estable de RCD.
	P3: ¿El incentivo económico del gobierno es suficiente para su empresa?	No. Los costes de tratamiento y reciclaje de los RCD son muy elevados, como el cribado del material y el reprocesado. Seguimos sometidos a una gran presión para obtener beneficios.
Investigadores relevantes	P1: ¿Cree que la gestión de los RCD en China es eficaz? En caso negativo, ¿cuáles cree que son las deficiencias más graves?	No. El seguimiento del proceso de transporte y tratamiento de los RCD es bastante ineficaz; la comunicación y la cooperación entre los departamentos de gestión correspondientes son insuficientes.
	P2: ¿Cree que la normativa sobre gestión de RCD es favorable?	Hay muchas normativas emergentes sobre gestión de RCD a nivel nacional y local. Sin embargo, siguen faltando normas/reglamentos para orientar la reducción de materiales en el diseño y la construcción de edificios. Mientras tanto, faltan normas sobre materiales de construcción reutilizados y reciclados.
	P3: En su opinión, ¿cuáles son las principales razones de la enorme generación de RCD en China?	La alta velocidad de urbanización y un diseño urbano inadecuado.

Adaptado de [5].

Apéndice F. Mapa simplificado del proceso del modelo de información BIM-CDW.



Tomado de [1].

Firma estudiante	Firma director (es)	Firma Jurado 1