

Análisis para la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición del Sector Vivienda en
Santiago de Cali: Estudio de Caso

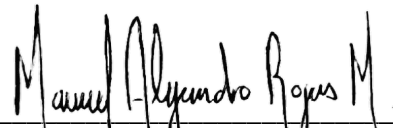
ROSA CRISTINA GONZALEZ LIMA

Nota de Aceptación

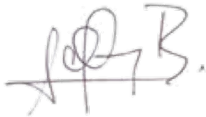
Certificamos que el presente Trabajo de Grado
Satisface, en alcances y calidad, todos los
requisitos Que demanda un Trabajo de Grado de
Maestría



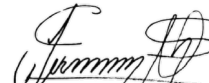
IVÁN FERNANDO OTALVARO CALLE
Director



MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO
Co-Director

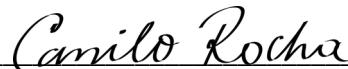


ANIBAL CÉSAR MAURY
Jurado 1

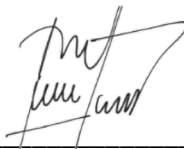


FERNEY QUIÑONES SINISTERRA
Jurado 2

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de
Magister en Ingeniería Civil



HERNAN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



JUAN CARLOS MARTINEZ ARIAS
Director Posgrados Facultad de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 7 de Mayo de 2021

Santiago de Cali, 28 de Mayo del 2021

Ingeniero:

Juan Carlos Martinez Arias

Director Posgrados de Ingeniería

Facultad de Ingeniería

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Dando contestación a las recomendaciones establecidas en el acta de correcciones referente al Trabajo de Grado denominado "Análisis para la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición del Sector Vivienda en Santiago de Cali: Estudio de Caso", realizado por la estudiante Rosa Cristina Gonzalez Lima con código 8936245 perteneciente al énfasis de Ingeniería en construcciones, bajo la dirección del profesor PhD. Iván Fernando Otalvaro Calle y codirector PhD. Manuel Alejandro Rojas Manzano. Se detalla a continuación:

1. Para fortalecer el concepto de economía circular en el proyecto, incluir información sobre los requerimientos del sistema en mampostería estructural: En la sección 4.6 Indicadores, se agrega la referencia bibliográfica recomendada y se incluye el cálculo del indicador WTA referente al consumo de materiales del proyecto en estudio.
2. Indicar la etapa en la que se desarrolló el proyecto. Extrapolar los cambios en la tipología para las diferentes etapas: En los apartados 4.1 Caso seleccionado y 4.2 Análisis de sitio se incluye el detalle de la etapa en la que se desarrolló el proyecto enfocándose únicamente a la fase de estructura.
3. Revisar la presentación de los resultados en las figuras 34 a 37. Se recomienda presentar el promedio de la variable y la desviación estándar: Se agrega a las figuras mencionadas la información estadística correspondiente a media y coeficiente de variación muestral.
4. Comparar las conclusiones del análisis realizado con otros escenarios internacionales referenciados en el segundo capítulo "Revisión Bibliográfica": En los numerales 4.6.1 al 4.6.3 referentes a indicadores de generación y aprovechamiento, se agrega la respectiva comparación con escenarios internacionales detallados en la revisión bibliográfica.

El suscrito director y codirector del Trabajo de Grado autorizan que se proceda a realizar su entrega, toda vez que ha revisado meticulosamente el documento y avalan que el Trabajo de Grado ya se encuentra listo.

Atentamente,

PhD. Iván Fernando Otalvaro
C.C. 15384209 de La Ceja

PhD. Manuel Alejandro Rojas
C.C. 10291663 de Popayán

Datos del Estudiante

Nombre: Rosa Cristina Gonzalez Lima
Dirección: Miguel Riofrío y 24 de Mayo Loja- Ecuador
Correo electrónico: rcgonzalez8591@gmail.com
Teléfono fijo: +593 72 723 708
Celular: +593 99 184 0075
Profesión: Ingeniera Civil
Nombre de Empresa: ARGON DISEÑOS Y CONSTRUCCION
Cargo: Coordinadora de proyectos



Santiago de Cali, 21 de Junio de 2018

Señores
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DE CALI
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Civil
Ciudad

ASUNTO: AUTORIZACIÓN USO DE INFORMACIÓN

Por medio del presente, autorizo a la Ingeniera Civil **ROSA CRISTINA GONZALEZ LIMA**, portador de la Cedula de Extranjería No. 666482, quien cursa la Maestría de Ingeniería Civil, énfasis en Construcciones, en esa universidad; para que pueda utilizar la Información de requerida para la realización de su trabajo de grado titulado: "Análisis para la gestión de residuos de construcción del sector de la vivienda en Santiago de Cali: Estudio de Caso". Dado que la Información será utilizada con fines académicos.

Esta certificación se expide a solicitud del interesado

Atentamente.

GUSTAVO HELBERT CUERVO C
Gerente de Construcción
CONSTRUCTORA BOLÍVAR S.A.

Dedicatoria

A Dios, por todas sus bendiciones

A mi madre, por ser mi apoyo y mi refugio

A Jonathan, porque su amor es un faro en mi camino

A mis hermanas, por creer en mí incluso en mi peor momento

Agradecimientos

A la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, por abrirme sus puertas y mostrarme la hospitalidad de Colombia a través de sus docentes y directivos, en especial y con mucho cariño:

Al Dr. Manuel Alejandro Rojas M., por su conocimiento, paciencia y carisma, impartidos durante el desarrollo del presente trabajo de investigación y dirección del programa académico.

Al Dr. Iván Fernando Otalvaro C., por sus conocimientos, consejos y motivación en la dirección de esta investigación y como docente del programa académico.

A Constructora Bolívar S.A, en especial al personal técnico del proyecto en estudio, por su apertura y amabilidad que hicieron del periodo en obra una experiencia invaluable.

A mis compañeros y amigos: Juliana, Diego y Alexander, por qué a pesar de las fronteras la amistad perdura.

A Erlo, Jazmine, Marco y al equipo del semillero Matcon, por su valioso aporte.

Sin el apoyo y colaboración de todos, esta investigación no hubiera sido posible.

RESUMEN

En Colombia la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) es una parte fundamental de los objetivos trazados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, esto derivado de la creciente generación en la industria, que se ha convertido en una verdadera problemática por el gran volumen que representa y la falta de rellenos autorizados. Así, a través de la resolución N°0472 de 2017, se exige la utilización de residuos de construcción y demolición aprovechables en al menos un 2% en peso, del total de los materiales usados en obra; a nivel local el Decreto 0771 de 2018 de La Alcaldía de Santiago de Cali reglamenta el control de la gestión integral de RCD, desde un 5 %, y en ambos casos el porcentaje aumentará un 2% anual hasta alcanzar el 30%.

Este proyecto de investigación propone una alternativa de gestión que abarca en su primera etapa el análisis de la generación del RCD, asociado al sistema constructivo de un proyecto de vivienda escogido de una muestra representativa del sector en Santiago de Cali, se incluye la recolección de información del proyecto, análisis del sitio, planos, actas y cantidades de obra, para obtener indicadores de generación. Determinando así, que sin la implementación de acciones de gestión específicas, sólo el 41% del volumen total de RCD generado podría ser empleado como agregados reciclado. En su segunda etapa se efectúa la recolección de muestras y caracterización de los RCD generados, a través de ensayos que determinen las propiedades físicas que definen las posibles aplicaciones para el aprovechamiento en obra; como la conformación de terraplenes al 100% y su incorporación de forma parcial en concretos no estructurales, afirmados y sub bases.

Finalmente, en su tercera etapa se establece un plan de gestión que identifica las practicas perjudiciales, comunes en el proceso constructivo, y propone soluciones para la implementación de estrategias que lleven a la obtención de materiales reutilizables en obra, lo que podría representar una inversión del 0.65% del presupuesto del proyecto, considerando las limitaciones y beneficios para la constructora. En cuanto al cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 del MADS, se establece que en las condiciones actuales del proyecto la capacidad de aprovechamiento de RCD corresponde a tan solo el 5,9% pudiendo alcanzar el 25% del peso total de los materiales empleados en función del peso por metro cuadrado.

ABSTRACT

In Colombia, the management of construction and demolition waste (CDW) is a fundamental part of the objectives laid down by Ministry of Environment and Sustainable Development, this derived from growing generation, which has become a real problem due to large volume it represents and the lack of authorized fillers. Thus, through resolution No. 0472 of 2017, use of construction and demolition waste is required in at least 2% by weight, of total materials spent on project. Locally Decree 0771 of 2018 from Mayor's Office of Santiago de Cali regulates the control of CDW integral management, from 5%, and in both cases percentage will increase by 2% annually until reaching 30%.

This research proposes a management alternative that includes in its first stage, the analysis of CDW generation associated with construction system of a housing project, chosen from a representative sample of sector in Santiago de Cali. It includes the collection of information about project, construction site analysis, plans and work quantities, to obtain generation indicators. Determining that without the implementation of specific management actions, only 41% of the total volume of RCD generated could be used as recycled aggregates. In its second stage, the collection of samples and characterization of CDW generated is carry out, through tests that determine its physical properties and define possible applications for reuse on site, such as the 100% conformation of embankments and their partial incorporation in non-structural concretes, road embankments and sub-bases. Finally, in its third stage a management plan is established to identifies harmful practices common in construction process and proposes simple solutions for strategies implementation that lead to obtaining reusable materials on site, which might represent an investment of 0.65% project's budget considering the limitations and benefits for constructor. Regarding compliance with MADS Resolution 0472 of 2017, it is established that under the current project conditions, RCD's utilization capacity corresponds to only 5.9%, being able to reach 25% of total materials weight used in function of weight per square meter.



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

ANÁLISIS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN DEL SECTOR VIVIENDA EN SANTIAGO DE CALI:
ESTUDIO DE CASO

ROSA CRISTINA GONZÁLEZ LIMA

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR:

Dr. IVAN FERNANDO OTALVARO CALLE

CO-DIRECTOR:

Dr. MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO

FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS

SANTIAGO DE CALI

2020

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición del problema de investigación.....	3
1.1.1 Hipótesis	5
1.1.2 Sub-preguntas de investigación	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Organización del documento escrito.....	6
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Generación de RCD	7
2.1.1 Generación de RCD en Europa.....	7
2.1.2 Generación de RCD en Asia.....	8
2.1.3 Generación de RCD en Norteamérica	9
2.1.4 Generación de RCD en Sudamérica	9
2.1.5 Generación de RCD en Santiago de Cali.....	10
2.2 Gestión de los RCD.....	13
2.2.1 Clasificación del RCD	14
2.2.2 Índices de generación.....	17
2.2.3 Planes de gestión.....	21
2.2.4 Estrategias para la implementación de la gestión de residuos en el sitio	38
2.2.5 Estrategias de seguimiento y control del plan de gestión	40
2.2.6 Aprovechamiento del RCD en obra.....	41
3. METODOLOGÍA	43
3.1 Selección del caso	44
3.1.1 Criterios de selección.....	44
3.1.2 Casos Potenciales.....	44
3.2 Recopilación de información	45
3.2.1 Análisis del sitio.....	45
3.2.2 Generación de RCD	45
3.2.3 Caracterización del RCD	50
3.3 Análisis de datos.....	55
3.3.1 Cantidades de obra ejecutada.....	55

3.3.2	Indicadores de Generación.....	56
3.3.3	Indicadores de Aprovechamiento	57
3.4	Aprovechamiento del RCD en obra	58
3.5	Diseño del plan de gestión	58
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	59
4.1	Caso Seleccionado.....	59
4.2	Análisis del sitio.....	60
4.3	Generación de RCD en el proyecto caso de estudio	64
4.4	Caracterización del RCD.....	66
4.4.1	Composición de los RCD muestreados en obra.....	67
4.4.2	Caracterización de los RCD aprovechables como agregados.....	69
4.5	Cantidades de obra ejecutada	78
4.6	Indicadores	82
4.6.1	Indicadores de Generación de RCD macro.....	83
4.6.2	Indicadores de generación de RCD por etapa constructiva	85
4.6.3	Indicadores de aprovechamiento	87
4.7	Aprovechamiento del RCD en obra	88
4.7.1	Uso Potencial	90
4.7.2	Oportunidades de aprovechamiento en obra.....	96
5.	DISEÑO DEL PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	97
5.1	Introducción	97
5.1.1	Datos del generador	97
5.1.2	Ubicación y descripción de la obra.....	97
5.2	Proyección de la generación de RCD.....	98
5.2.1	Índices de generación evaluados.....	98
5.2.2	RCD susceptible de aprovechamiento	98
5.2.3	RCD no susceptible de aprovechamiento	99
5.3	Estrategias para la gestión de RCD.....	99
5.3.1	Agentes involucrados en la producción y gestión de RCD	99
5.3.2	Medidas para la prevención de la generación de RCD.....	100
5.3.3	Medidas para la separación obligatoria en el origen (SSO).....	100

5.3.4	Organización de obra y áreas para la disposición de RCD.....	101
5.3.5	Procedimiento de manejo para las actividades específicas.....	102
5.3.6	Acciones de orientación a agentes involucrados	103
5.3.7	Fiscalización y control de los agentes involucrados.....	104
5.3.8	Indicadores de gestión	104
5.4	Gestores del RCD.....	105
5.5	Vinculación del PGRCD al aprovechamiento de RCD.....	105
5.6	Presupuesto estimado para la implementación.....	107
6.	CONCLUSIONES	109
6.1	Conclusiones	109
6.2	Recomendaciones para trabajos futuros.....	111
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
	ANEXOS	119
	Formatos implementación plan de gestión de RCD.....	119
	Medición y Control de movimiento interno de residuos.....	119
	Formato de seguimiento y aprovechamiento de los RCD en Obra.....	120
	Control de transporte de residuos (CTR) y hoja de registro de destino.....	121
	Informe de aprovechamiento en sitio, Anexo II Formato certificado de aprovechamiento de RCD del Decreto 0771-2018 Alcaldía de Cali	122
	Identificación y control de RCD entregado a gestores, Anexo III Formato Constancia de Gestores de RCD del Decreto 0771-2018 Alcaldía de Cali.....	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cantidad en peso (ton) de escombros generados con proyecciones al año 2016, DAGMA (2013).....	10
Figura 2: Comparación de los índices preliminares de Rc aprovechables Vs contaminados, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial (2018).	12
Figura 3. El ciclo de vida de las edificaciones, Brick (2008)	13
Figura 4. Resumen de obligaciones de productores y poseedores de RCD, Gobierno Andalucía/Agencia de Obra Publica et al. (2013).....	22
Figura 5. Resumen de obligaciones de gestores de RCD, Gobierno Andalucía/Agencia de Obra Pública et al. (2013)	23
Figura 6. Modelo de presupuesto para el EGR, Ihobe SA/Gobierno Vasco (2012)	29
Figura 7. Jerarquía de aprovechamiento de los RCD, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C./ Secretaria Distrital de Ambiente (2015)	34
Figura 8. Etapas de implantación de la gestión de residuos, COMPETIR et al. (2006)...	38
Figura 9. Metodología para el desarrollo de la investigación	43
Figura 10. Formato para registro de mediciones Parte 1, Pontificia Universidad Javeriana Cali, (2017)	48
Figura 11. Formato para registro de mediciones Parte 2, Pontificia Universidad Javeriana Cali, (2017)	49
Figura 12. Proceso de caracterización de muestras en el laboratorio	50
Figura 13. Configuración arquitectónica de la vivienda tipo en el proyecto MI.	61
Figura 14. Distribución en plata del campamento de obra.....	61
Figura 15. Distribución en plata del proyecto.....	62
Figura 16. Acopios finales de RCD en el campamento.	62
Figura 17. Zona de corte de ladrillo y acopio de residuos generados.	63
Figura 18. Puntos de acopio temporal de residuos.....	63
Figura 19. Acopio de residuos al interior de las unidades de vivienda.....	64

Figura 20. RCD generado en zona de cortadoras.....	65
Figura 21. Distribución de los RCD de acuerdo a la clasificación básica para el aprovechamiento.	66
Figura 22. Procesamiento del RCD para la obtención de muestras	67
Figura 23. Composición de los RCD muestreados en las unidades de vivienda en peso. 68	
Figura 24. Composición de los RCD muestreados en las unidades de vivienda en volumen.	68
Figura 25. Pesos unitarios de las muestras recolectadas en la zona de corte de ladrillo... 69	
Figura 26. Ensayo de clasificación de agregado reciclado de concreto	70
Figura 27. Clasificación del ARC muestreado en las unidades de vivienda según la norma UNE EN 933 11- 2010.....	70
Figura 28. Cantidad de material flotante de las muestras en las unidades de vivienda según la norma UNE EN 933 11- 2010.....	71
Figura 29. Clasificación del ARC recolectado en la zona de corte de ladrillo según la norma UNE EN 933 11- 2010.....	71
Figura 30. Ensayo granulométrico de agregados reciclados	72
Figura 31. Distribución granulométrica por tamizado del ARC muestreado en las unidades de vivienda.	73
Figura 32. Distribución granulométrica por tamizado del ARC muestreado en la zona de corte de ladrillo.	74
Figura 33. Ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino.....	75
Figura 34. Resultados de absorción del agregado fino en la muestra de ARC tomada en las viviendas.	75
Figura 35. Resultados de absorción del agregado fino en la muestra de ARC tomada en la zona de corte.	76
Figura 36. Resultados de absorción del agregado grueso en la muestra de ARC tomada en las viviendas.....	76

Figura 37. Resultados de absorción del agregado grueso en la muestra de ARC tomada en la cortadora de ladrillo.	77
Figura 38. Resultados de los ensayos de desgaste por abrasión en la máquina de Los Ángeles.....	78
Figura 39. Índices de Generación WGR para distintos países.....	84
Figura 40. Índices de generación de RCD en etapa de estructura de diferentes autores...	84
Figura 41. Comparación de granulometría muestras de ARC vivienda vs curva Füller. .	90
Figura 42. Comparación de granulometría muestras de ARC zona de corte vs curva Füller.	91
Figura 43. AR caracterizado vs franja granulométrica del material de afirmado INV Art.311-13.....	93
Figura 44. AR caracterizado vs franja granulométrica del material de sub-base granular INV Art.320-13.....	94
Figura 45. AR caracterizado vs franja granulométrica del material de base granular INV Art.330-13.....	95
Figura 46. Ubicación general del proyecto	97
Figura 47. Ejemplo de la separación de los RCD en sus componentes para el aprovechamiento	100
Figura 48. Acopio temporal en proyectos vs propuesta de acopio temporal para la separación del RCD.....	101
Figura 49. Acopios estacionarios en proyectos anteriores vs propuesta de cajones estacionarios.....	102
Figura 50. Dinámica de almacenamiento y flujo de distribución presentada en proyectos anteriores.....	103
Figura 51. Uso de RCD provenientes de la zona de corte como material de lastre para mejorar el tránsito de volquetas.	106
Figura 52. Uso de RCD como material de relleno en elemento no estructural.....	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tasa de residuo de construcción y demolición reciclado y vertido en rellenos en Europa.	4
Tabla 2. Lista Europea de Residuos (EWL, por sus siglas en ingles).....	14
Tabla 3. Composición de los áridos gruesos reciclados.....	17
Tabla 4. Cantidad de RCD producidos (kg/m ²)	18
Tabla 5. Producción de RCD (m ³ /m ²) en la demolición de un edificio de uso residencial	19
Tabla 6. Índices de estimación de generación de RCD para obra nueva de edificio residencial	19
Tabla 7. Desperdicio esperado en la ejecución de un sumidero de 51 x 51 x 100 cm.....	20
Tabla 8. Resumen de Investigaciones sobre los principales usos potenciales de los residuos de construcción y demolición.....	42
Tabla 9. Clasificación de residuos de construcción para la recolección de datos.....	46
Tabla 10. Normas técnicas usadas en ensayos de laboratorio.....	51
Tabla 11. Masa de la porción de ensayo de clasificación de agregado reciclado ARC....	52
Tabla 12. Directrices sobre la masa de al menos 1000 partículas clasificación del ARC.	52
Tabla 13. Distribución de tamices para ensayo de granulometría	53
Tabla 14. Granulometrías de la muestra para ensayo de abrasión y desgaste.....	55
Tabla 15. Cumplimiento de criterios de selección en casos potenciales.....	59
Tabla 16. Resumen de información registrada en una medición.	65
Tabla 17. Resumen del control de generación de residuos a partir de las visitas de campo.	66
Tabla 18. Resultados del peso unitario en cada uno de los RCD muestreados en las unidades de vivienda según su composición.....	69
Tabla 19. Resultados de distribución granulométrica de muestras ARC en vivienda	72
Tabla 20. Resultados de distribución granulométrica de muestras ARC en zona de corte	73
Tabla 21. Resultados gravedad específica ARC fino muestreado en interior viviendas. .	75
Tabla 22. Resultados gravedad específica ARC fino muestreado en zona de corte.	76
Tabla 23. Resultados gravedad específica ARC grueso muestreado en interior viviendas.	76

Tabla 24. Resultados gravedad específica y absorción ARC grueso muestreado en zona de corte.....	77
Tabla 25. Parámetros empleados en la determinación de la resistencia al desgaste de los agregados.....	77
Tabla 26. Resumen de cálculo de cantidades de obra y peso para una vivienda	78
Tabla 27. Resumen de cargas del proyecto según informe estructural (1 casa)	79
Tabla 28. Registro de material desalojado vs RCD generado en proyecto	80
Tabla 29. Resumen de actas de obra del proyecto en el periodo de estudio	81
Tabla 30. Consumo de materiales de construcción según sistema constructivo en Santiago de Cali (ACODAL, 2017).....	82
Tabla 31. Indicadores de generación de RCD macro.....	83
Tabla 32. Desglose de la generación enfocada a los ARC.....	85
Tabla 33. Indicador de generación de RCD en concretos, incluye hormigón, grouting y morteros.....	86
Tabla 34. Indicador de generación de RCD en mampostería.....	86
Tabla 35. Potencial de aprovechamiento con relación a la generación actual.	87
Tabla 36. Indicadores de aprovechamiento potencial de RCD.	88
Tabla 37. Comparación de las características del ARC del proyecto vs agregados reciclados mixtos.....	89
Tabla 38. ARC caracterizado vs requisitos de ARC para concretos según CEDEX (2014) y NTC-174.	92
Tabla 39. ARC caracterizado vs requisitos de materiales para terraplenes según INVIAS.	93
Tabla 40. Muestras caracterizadas vs relaciones que debe cumplir el material de afirmado INV Art.311-13.....	94
Tabla 41. Proyección de la generación de RCD del proyecto en volumen y peso	98
Tabla 42. Reutilización, valorización o disposición final.	106
Tabla 43. Presupuesto del plan de gestión	108

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento del área urbana es la transformación demográfica más significativa de nuestro siglo, alrededor del 90% del crecimiento urbano mundial tiene lugar en los países en desarrollo, quienes triplicarán sus áreas edificadas entre 2000 y 2030. En este lapso de tiempo se estima la construcción de 400.000 km², equivalente a toda la superficie urbana construida del mundo en el 2000 (Suzuki, Dastur, Moffatt, Yabuki, & Maruyama, 2010). Estos procesos masivos de urbanización inevitablemente, son y serán el centro de nuestro futuro ambiental al implicar el reto de usar los recursos disponibles y cada vez más escasos de la forma más práctica y eficiente posible, para lo cual se espera que el sector de la construcción sea un gran contribuyente hacia la transformación sostenible de realidades. No obstante, las demandas de materiales y energía para su desarrollo seguramente tendrán importantes efectos en diversos lugares, tanto dentro como fuera de las propias ciudades (Ramírez, 2014).

Por esta razón la mayoría de países en el mundo invierten en un sistema formal de gestión para reducir el vertimiento ilegal y sistemático, que causa la sedimentación de los ríos, la obstrucción de los desagües, la degradación de las áreas y el agotamiento de las zonas de vertederos y rellenos, además de los altos costos socioeconómicos, especialmente en ciudades de mediano y gran porte (Angulo, 2005). Entre las áreas de especial preocupación ambiental vinculadas a los procesos constructivos se encuentran las asociadas con el uso de energía generadora de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), sin contar las principales afectaciones generadas por la inadecuada gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD), entre las que se encuentran la contaminación al aire, agua y suelo.

Los residuos de construcción y demolición, anteriormente conocidos como escombros, son los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas, que se clasifican de forma global en dos grupos: los susceptibles de aprovechamiento y los no susceptibles de aprovechamiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Las estrategias de manejo en las que se enfoca el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición son: la implementación de medidas para la mejora de la gestión de los residuos, es decir el diseño de buenas prácticas en las distintas fases del proyecto, considerando además una generación mínima; y la definición de medidas para la mejora en el reciclaje de estos

residuos, mediante la búsqueda de aplicaciones tales como, la reutilización de material de excavación en rellenos o el uso potencial de residuos de concreto como agregados, que pueden ser utilizados con diferentes fines.

En Colombia la gestión de residuos de construcción y demolición es una parte fundamental de los objetivos trazados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), a través de la resolución N°0472-2017, en la cual se exige la utilización de los residuos de construcción y demolición aprovechables en al menos un 2% en peso, del total de los materiales usados en obra; aplicable en el territorio nacional desde el 2018, este porcentaje aumentará un 2% anual hasta alcanzar el 30%. Esto derivado de la creciente generación, que se ha convertido en una verdadera problemática, por el gran volumen que representa y la falta de rellenos autorizados, principalmente en urbes medianas y grandes.

En ciudades como Bogotá, Medellín, Santiago de Cali, Manizales, Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Barranquilla, Neiva, Valledupar y San Andrés, la generación de residuos de construcción y demolición, conforme al diagnóstico integral del modelo actual de la gestión de residuos, en el año 2011 se produjeron 22.270.338 toneladas de residuos de construcción y demolición (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017); con esta alarmante cifra comenzó el desarrollo del marco legal para el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición, que busca darle un giro no solo a la problemática de los residuos, sino también a la cultura del sector constructivo.

La Alcaldía de Santiago de Cali, (2018), mediante el Decreto 0771, reglamenta el control a la gestión integral de RCD, mismo que dispone el aprovechamiento del 5% en peso del total de los materiales usados en obra, y se incrementara en dos puntos porcentuales hasta cumplir con la meta del 30%, la vigencia del presente decreto fue desde su fecha de emisión en diciembre de 2018, derogando al Decreto 0291 del 2005; facultando al Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) como ente de control.

De lo anteriormente expuesto se deriva la necesidad de establecer planes de gestión integral de RCD, que sirvan para evaluar la efectividad en la recuperación por medio de la separación en el origen, que es el primer paso y el reto más grande que afrontar; y posteriormente el aprovechamiento en obra, ligado a medir la competitividad de la gestión en el cumplimiento de la

resolución N°0472 de 2017 del MADS y las regulaciones locales como el Decreto 0771 de 2018 de La Alcaldía de Santiago de Cali.

1.1 Definición del problema de investigación

Es bien sabido que las actividades de construcción pueden mejorar el desarrollo urbano y entorno de vida global de múltiples maneras. Sin embargo, la industria de la construcción ha sido criticada como una de los causantes principales de degradación ambiental en todo el mundo al ser, por un lado, gran consumidor de recursos naturales y, por el otro, un productor importante de residuos (Poon, Yu, & Jaillon, 2004).

Como ya se ha mencionado la mayoría de países trabajan en generar políticas que ayuden en la gestión de residuos de construcción y demolición. Referentes en esta gestión son países como Bélgica, Dinamarca y Países Bajos, que en la actualidad se encuentran a la vanguardia en el tratamiento y aprovechamiento de estos materiales, con sistemas que incluyen separación en la fuente, tratamientos específicos y aprovechamiento en diferentes áreas de la construcción, disminuyendo el porcentaje de material residual a ser dispuesto (Pacheco, Fuentes, Sánchez, & Rondón, 2017).

En Holanda, por ejemplo, se prohíbe tirar residuos de construcción y demolición reciclables desde 1997, además cuentan con el Plan Nacional de manejo de residuos 2009-2021, el cual se dirige de políticas de los residuos a políticas de cadenas de materiales, y existen estándares mínimos para la gestión de varios materiales (National Waste Plan, 2008).

En el Reino Unido aunque no se alcanzan tasas elevadas de reciclaje existe una normativa específica (Building Act) que contempla las regulaciones y licencias para construcción, la supervisión del trabajo constructivo y otros complementos de la construcción; así como códigos de buenas prácticas para demolición, ambos llevan años implementándose y mejorándose (González, Díaz, & Rodríguez, 2012).

En España el Real Decreto 105/2008, regula la producción y gestión de residuos de construcción y demolición. Además de contar con un Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición, la mayoría de comunidades autónomas tienen disposiciones concretas y planes de gestión de residuos; y muchos ayuntamientos poseen normativa específica al respecto (Asenjo, 2008).

En Alemania de acuerdo con el concepto de ciclo de vida, los residuos recuperables de construcción y demolición no deben de ser tirados; Austria obliga por ley a separar y reciclar estos residuos desde 1993. La mayoría de los estados miembros han adoptado la medida de exigir un impuesto sobre el vertido, la naturaleza de este impuesto varía de un estado miembro a otro y es un costo añadido al precio de admisión al vertedero (Rojas, 2014). Como se muestra en la Tabla 1 los países con las tasas más altas de reciclaje, son también los que implementan impuestos más altos por disposición de residuos en los rellenos, lo que refleja la efectividad de esta estrategia.

Tabla 1. Tasa de residuo de construcción y demolición reciclado y vertido en rellenos en Europa.

Países	Generación de RCD (millones de toneladas)	RCD Reciclado (%)	RCD Enviado al relleno o incinerado (%)	Impuesto por disposición en rellenos (€ por tonelada)
Alemania	59	17	83	0
Reino Unido	30	45	55	2,9
Francia	24	15	85	6
Italia	20	9	91	1
España	13	< 5	> 95	0
Países Bajos	11	90	10	23-90
Bélgica	7	87	13	5,75-16
Austria	5	41	59	5,79
Portugal	3	< 5	> 95	0
Dinamarca	3	81	19	45
Grecia	2	<5	> 95	0
Suecia	2	21	79	30
Finlandia	1	45	55	19
Irlanda	1	<5	> 95	0
Luxemburgo	0	N/A	N/A	N/A

Fuente: Kien, Thanh, & Lu (2013).

De los países antes mencionados, los que registran las tasas más altas de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, deben su progreso en la materia a la falta de recursos naturales, es esta necesidad la que a su vez convierte la temática en parte de su cultura. En Colombia la meta propuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, debe lograr reincorporar para el 2030 el 30% en peso del total de los materiales usados en obra, poniendo las expectativas del sector bastante altas, ¿estamos realmente preparados para afrontar este reto?

Considerando que culturas como la alemana y francesa con décadas de trayectoria en este ámbito, reciclan el 17 y 15% de sus residuos de construcción y demolición; en nuestro medio

además, aun gozamos de recursos naturales que explotar, y los diferentes factores de informalidad que influyen en la construcción hacen que el uso óptimo de nuestros recursos y el reciclaje de los residuos generados sea un problema relevante para el progreso.

Por estas razones las estrategias y modelos citados, pueden no ser directamente aplicables a la realidad colombiana, pero sirven de base para proponer alternativas de gestión como la que se espera desarrollar en este proyecto de investigación a través de un plan integral de gestión de residuos de construcción en el contexto de un proyecto de vivienda en la ciudad Santiago de Cali.

1.1.1 Hipótesis

Para dar cumplimiento a la Resolución N° 0472 de 2017 del MADs y Decreto 0771 de 2018 de La Alcaldía de Santiago de Cali, los elementos mínimos requeridos para proyectar de manera realista las acciones de gestión deben involucrar la cantidad de residuos que se generan, el porcentaje de materiales aprovechables y de estos la cantidad que pueden ser usados en el sector constructivo, estas variables deben reconocerse considerando el tipo de edificación, sistema constructivo, manejo de materiales y residuos en obra. De acuerdo con esto el presente trabajo plantea la siguiente hipótesis:

- La generación de residuos de construcción y demolición potencialmente aprovechables del sector vivienda local permite cumplir las metas planteadas en la Resolución N° 0472-2017 del MADs y el Decreto 0771 de 2018 de La Alcaldía de Santiago de Cali.

1.1.2 Sub-preguntas de investigación

Teniendo en cuenta la hipótesis anterior, es necesario responder las siguientes sub-preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la cantidad y tipo de residuos de construcción y demolición que genera un proyecto de vivienda, asociado a su sistema constructivo?
- ¿Cuál es la cantidad de residuos reciclables y su aprovechamiento potencial como materiales de construcción?
- ¿Las condiciones actuales de obra permiten formular las estrategias de gestión integral de residuos de construcción y demolición que se ajuste a su generación y necesidades?

1.2 Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es el estudio la generación de residuos de construcción y demolición en un proyecto de vivienda en la Ciudad de Cali con fines de gestión en obra, para dar cumplimiento a las metas planteadas en la Resolución N° 0472 de 2017 del MADS y Decreto 0771 de 2018 de la Alcaldía de Santiago de Cali.

Para alcanzar el objetivo general fue necesario cumplir los objetivos específicos que se describen a continuación:

- Caracterizar la generación de residuos de construcción y demolición en el proyecto.
- Evaluar alternativas de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en obra.
- Diseñar un plan de gestión de residuos de construcción y demolición.

1.3 Organización del documento escrito

En el Capítulo 1 se presenta el problema de investigación incluyendo los objetivos que se pretenden completar para dar respuesta a la pregunta central y las subpreguntas.

El Capítulo 2 presenta la revisión bibliográfica necesaria para contextualizar el trabajo, el mismo está dividido en dos grandes partes. La primera parte se concentra en el problema de generación de residuos de construcción y demolición (RCD), mientras que la segunda parte hace referencia a la gestión de residuos de los RCD.

La metodología empleada durante el trabajo de grado está detallada en el Capítulo 3, partiendo de la identificación del caso de estudio, la estrategia de caracterización de los residuos y la información básica para la formulación del plan de gestión.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados del análisis de generación de residuos y la caracterización de los mismos con el objeto de establecer las estrategias del plan de gestión.

La formulación del plan de gestión está contenida en el Capítulo 5, la cual se complementa con algunos anexos.

Finalmente, el Capítulo 6 contiene las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros derivadas del proceso investigativo del trabajo de grado.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica que da soporte al presente trabajo, el Capítulo está dividido en dos partes fundamentales: i) generación de residuos de construcción y demolición RCD; y ii) Gestión de los RCD.

2.1 Generación de RCD

La situación referida a la generación de escombros, va más allá de los impactos ambientales que pueden causar su inadecuada manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final. Hoy está claro que la responsabilidad en el manejo adecuado de cualquier tipo de residuo, y particularmente de los residuos de construcción y demolición, es de cada uno de los generadores, y que inicia en el momento mismo de la generación, hasta su aprovechamiento o disposición final. La problemática se torna crítica para los constructores cuando su gestión está asociada a grandes volúmenes, lo que implica altos costos en transporte y almacenamiento (Shafica Cadavid, 2015).

Así, la primera pregunta a plantear es ¿Cuánto residuo de construcción y demolición generamos? Estimaciones apuntan a una producción mundial entre 2 y 3 mil millones de toneladas/año (COMPETIR, SENAI, SEBRAE, & GTZ, 2006), por continentes tenemos:

2.1.1 Generación de RCD en Europa

La primera aplicación importante de los residuos de construcción y demolición se registró sólo después de la segunda guerra mundial, para la reconstrucción de las ciudades europeas con sus edificios completamente demolidos, los escombros y los residuos resultantes después de un proceso de trituración se usaron como agregados destinados a satisfacer las demandas de la época (Wedler & Hummel, 1946). Por lo tanto, se puede decir que a partir de 1946 se inició el desarrollo de la tecnología para el reciclaje de escombros de construcción (Bueno et al., 2013).

En la actualidad la exigencia del desarrollo basado en la sostenibilidad y la preservación del medio ambiente a nivel mundial, ha llevado a la comunidad global a realizar constantes investigaciones sobre nuevas técnicas sostenibles que permitan el desarrollo, con la mínima afectación de los recursos y la biodiversidad. Para el caso de los residuos de construcción y demolición, países de Europa occidental, como Suiza, Dinamarca y Países Bajos, son pioneros en el reciclaje de escombros; además han implementado políticas ambientales que han logrado construir una especie de estructura social y económica que gira en torno al aprovechamiento de residuos de construcción. Esa mentalidad ha sido motivada por la definición de políticas

restrictivas, la escasez de recursos naturales y, sobre todo, el gran valor económico que se da al suelo (Shafica Cadavid, 2015).

Si bien los residuos de construcción y demolición tienen un alto potencial de reciclaje y reutilización, sólo una pequeña parte está realmente recuperada, ya que, aunque las técnicas de reciclaje de construcción y demolición han evolucionado, no se puede decir que se haya convertido en una idea generalizada. Existen grandes diferencias entre los países de la Unión Europea en lo que a generación y aprovechamiento se refiere. Alemania, Reino Unido, Francia e Italia registran la generación más alta con 59, 30, 24 y 20 millones de toneladas al año respectivamente; y alrededor del 75% de estos residuos se disponen en los rellenos sanitarios. Sin embargo, ya se han alcanzado tasas de reutilización por encima del 80% en países como Dinamarca, Bélgica y Países Bajos; que generan 3, 7 y 11 millones de toneladas al año respectivamente (Ortiz, Pasqualino, & Castells, 2010).

2.1.2 Generación de RCD en Asia

China actualmente produce la mayor cantidad de residuos de construcción y demolición en el mundo que excede 1 billón de toneladas en 2012 y hasta 1,13 billones de toneladas en 2014. El rápido crecimiento de la infraestructura por ser el centro financiero de muchas empresas, ha contribuido a la producción de un gran volumen de residuos en el país. La gran parte de los desechos se presenta en forma de tierra y rocas excavadas, que tiene el potencial de ser reutilizada, pero los datos de reciclado y reutilización no están disponibles en la actualidad (Lu, 2014).

India genera 530 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición, convirtiéndose en el segundo mayor productor del mundo. El hecho sorprendente en este escenario es que las normas indias no permiten el uso de agregados reciclados en el hormigón de acuerdo con la norma IS 383, donde se fomenta el uso de materiales de origen natural. Por lo tanto, es imprescindible que la India comience a considerar estrategias de gestión de residuos como Europa y otros países desarrollados. La iniciativa del gobierno es necesaria para alentar el uso de agregados reciclados y evitar la disposición de los residuos en los rellenos (Akhtar & Sarmah, 2018).

Por otro lado, Japón produjo aproximadamente 75 millones de toneladas de residuos de actividades de construcción y demolición en 2011, sin embargo, mostró una tendencia decreciente en comparación con 1996 y 2001 donde la producción fue de 99 y 85 millones de toneladas respectivamente. Japón se ha fijado el objetivo de lograr una tasa de reciclaje de hasta el 95% de

estos residuos. Las tasas de reciclaje hasta 2008 mejoraron notablemente con un promedio de más del 90% en comparación con el 57% en 1996 en la categoría de desechos de construcción, bloques de asfalto y hormigón (Nakajima & Futaki, 2002). Este cambio notable se produjo debido a la aplicación de la ley relacionada con el reciclaje de materiales de construcción en mayo de 2002. Los materiales considerados obligatorios para el reciclaje en esta regulación incluyen concreto, hierro, madera y asfalto. La introducción de esta regulación contribuyó a la conciencia e importancia del reciclaje en el país, así como a la reducción de la cantidad de desechos dirigidos hacia los rellenos (Akhtar & Sarmah, 2018).

2.1.3 Generación de RCD en Norteamérica

Estados Unidos es uno de los mayores productores de residuos de construcción y demolición del mundo, generando más de 500 millones de toneladas por año. En un informe sobre la generación de desechos la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), reveló que la porción más alta de residuos provenía del concreto de cemento Portland con una participación del 70% (USEPA, 2016). Según Townsend, Wilson, & Beck (2014), alrededor del 70% de los residuos de construcción y demolición generados son reciclados.

Canadá produce aproximadamente más de 9 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición al año, pero a pesar de que la generación de residuos es mucho más baja que en los EE. UU., la tasa de reciclaje es tan solo del 7%, dando lugar a que la mayoría del material termine en los vertederos (Statistics Canada, 2015).

2.1.4 Generación de RCD en Sudamérica

En Brasil, la producción estimada de residuos de construcción y demolición es de más de 70 millones de toneladas por año. Si bien el gobierno recientemente implementó nuevas leyes y legislaciones sobre el reciclaje de desechos, la tasa de recuperación es aun mínima (Contreras et al., 2016). La producción de residuos de construcción y demolición en México es bastante baja en comparación con Brasil, aproximadamente 12 millones de toneladas anuales (Aguilar, Gómez, & Rojas, 2017). México clasifica los residuos de construcción y demolición de forma similar a Brasil, pero además han establecido los límites para la reutilización anual en el reciclaje de cada una de las categorías. La categoría A que contiene mortero y material de concreto se debe reciclar en al menos un 30%; sin embargo, el porcentaje de reciclaje aumentará a una tasa del 15% por año de manera que alcance el 100% (García, Martínez, Sandoval, & Martínez, 2012).

Un factor que contribuyó en los países para ayudar en el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, es el cobro de una cuota por la generación; porque sólo cuando el generador comienza a sentir los efectos financieros de sus residuos, se siente obligado a hacer reciclaje. Estos datos demuestran que la industria de reciclado de residuos se muestra prometedora frente a las ventajas económicas y ambientales del proceso, lo que permite el uso de estos productos en diversos campos de la construcción (Bueno et al., 2013).

2.1.5 Generación de RCD en Santiago de Cali

En Cali la situación de los residuos de construcción y demolición, se refleja en escenarios críticos como la estación de transferencia en la Carrera 50; solo a este punto llegan diariamente alrededor de 500 m³ de estos residuos. Otro problema son los 165 puntos de arrojado clandestino de escombros, que la unidad administrativa especial de servicios públicos municipales tiene mapeados en la ciudad (Mera, 2018).

Según el Plan de Desarrollo 2012-2016 de Santiago de Cali, para el 2016 ya se debió implementar una alternativa de aprovechamiento para los residuos de construcción y demolición (Embus & Quintero, 2015); así mismo este informe estimaba una proyección de 500.246 ton en la generación para ese año, como se muestra en la Figura 1, sin embargo en la actualidad según la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, seccional Occidente, se calcula que en la ciudad y sus sectores adyacentes se generan más de 2500 m³ al día, es decir, casi un millón de toneladas de residuos de construcción y demolición por año (El País, 2018), el doble de lo que se proyectaba generar.

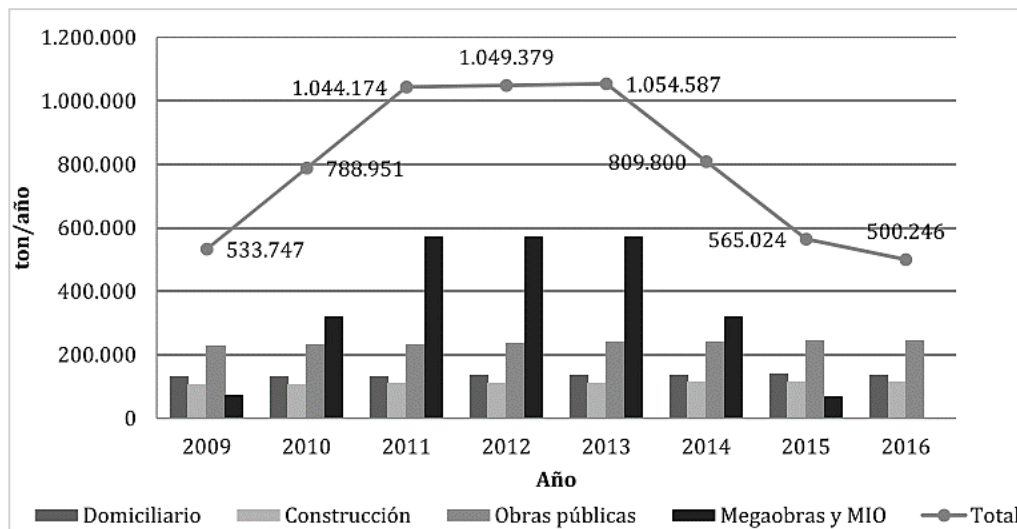


Figura 1. Cantidad en peso (ton) de escombros generados con proyecciones al año 2016, DAGMA (2013).

En el sector de la construcción los agregados representan alrededor de un 75% del total de los materiales empleados, mientras que un 15% corresponde a cementos, carbonato cálcico, arcillas, piedra y yeso; el 10% restante está formado por metales, madera y plástico. Investigaciones en Brasil, revelaron que al menos el 20% del peso de todo el material involucrado en una obra es desperdiciado. Este índice es casi el doble de los niveles registrados en Europa, en países como Francia e Inglaterra el número varía de 10 a 15% (Jovchelevich, 1994). Si se considera además que los escombros útiles para reciclar corresponden al 75% de la generación del sector (Salazar, 2011); al contrastar los datos con la meta planteada en Colombia de aprovechar el 30% en peso de los materiales usados, desde ya se proyecta la incertidumbre sobre la capacidad de la industria en el cumplimiento de la misma, más aun cuando no se cuenta con las herramientas necesarias como un marco normativo, guías o recomendaciones sobre el uso del material técnicamente adecuado, que permita un desarrollo conjunto del sector de la construcción.

La parte fundamental del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, radica en el uso de agregados obtenidos a partir del reciclaje, cuya temática se enfoca en la competitividad del mercado, determinada por el precio al que se puedan adquirir en relación a los agregados naturales disponibles. Los residuos se pueden aprovechar en la producción de arenas y gravillas aptas para preparar: morteros de mampostería, groutins, andenes, solados, elementos estructurales hasta de 21 MPa, bloques, tejas de microconcreto, ladrillos silico - calcáreos, bases para carreteras, etc. Se recupera también madera, metales, papel, plástico y vidrio que puede ser aprovechado por otras industrias (Salazar, 2011).

En noviembre de 2010, Salazar llevo a cabo un pequeño proyecto de aprovechamiento en el que produjo para el parque temático de Aguablanca, 240 m³ de gravilla de colores a partir de residuos a un costo de \$ 24.000/m³. En este año la grava triturada en Cali se cotizó a \$ 48.000/m³ y la arena proveniente del río Cauca entre \$ 15.000 y 30.000/m³. En el mismo periodo en Europa los agregados reciclados tuvieron un precio promedio de 3,2 €/ton lo que equivalía aproximadamente a \$ 12.960/m³.

Una investigación más reciente llevada a cabo en Bogotá, resalta las ventajas del aprovechamiento de residuos en obra, encontrando que las diferencias de costos relacionados con la elaboración de un concreto convencional y uno con agregado de concreto reciclado, se basan en diferentes aspectos; algunos de ellos si bien es cierto no se reflejan en el costo del concreto, pero impactan positivamente el presupuesto de una obra al reducir sus gastos en actividades como el

transporte y disposición de residuos; determinando que los precios del agregado de concreto reciclado frente al agregado de concreto natural denota un ahorro del 25,2%; debido a que los costos de producción del agregado natural vinculan la utilidad que se espera obtener al explotar cualquier terreno, y los costos de trámites y licencias de explotación (Ospina, Moreno, & Rodríguez, 2017).

En un plan piloto de caracterización de residuos de construcción y demolición, llevado a cabo por el Departamento de Ingeniería Civil e Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana, basado en mediciones de la generación de residuos de construcción de 4 proyectos de vivienda en la ciudad de Cali, se obtiene una visión preliminar del sector manifestada en la Figura 2, donde se muestra los índices preliminares obtenidos para la generación de los residuos potencialmente aprovechables y contaminados, la situación es crítica y refleja el estado de la mayoría de las obras en el medio, los residuos aprovechables se pierden por la mala gestión y terminan siendo contaminados e irremediamente destinados a la disposición final en las escombreras de la ciudad.

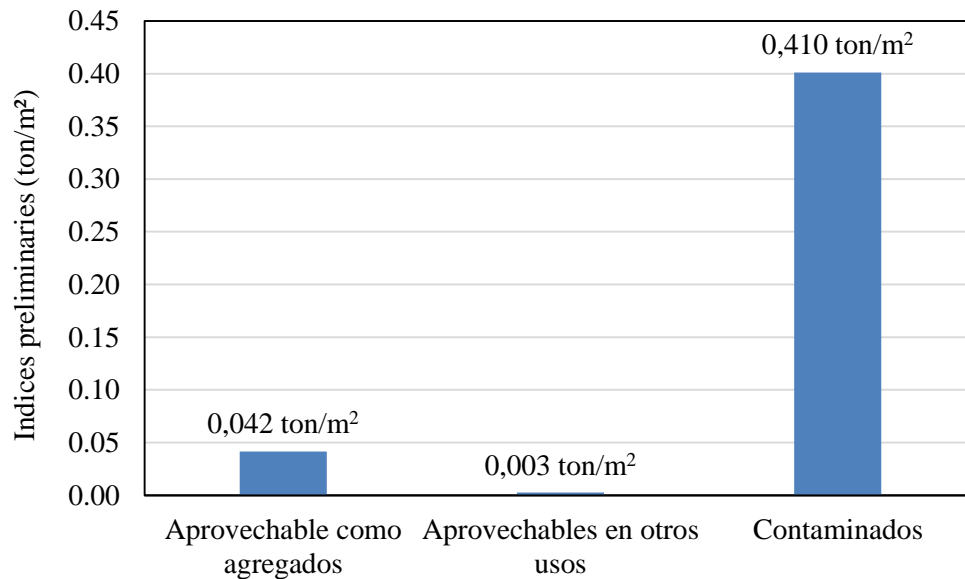


Figura 2: Comparación de los índices preliminares de Rc aprovechables Vs contaminados, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial (2018).

El modelo actual de gestión en materia de residuos de construcción que llevan a cabo la mayoría de las constructoras es prácticamente nula en cuanto al aprovechamiento y se limita a estimar la cantidad total del residuo generado. En definitiva, existe una importante falta de planes de gestión de residuos de construcción y demolición; así como de proyectos de aprovechamiento

en obra. Este proyecto de investigación busca establecer el potencial de la gestión en el cumplimiento de la Resolución N°0472-2017 del MADS; y como medio para garantizar a través de un proyecto de reciclaje en obra, el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición.

La Alcaldía de Santiago de Cali (2018), mediante Decreto 0771 de 2018, reglamenta el control de la gestión integral de RCD, el mismo que dispone a los grandes generadores de residuos con áreas construidas igual o superior a 2000 m², el aprovechamiento del 5% en masa del total de los materiales usados en obra, y se incrementara en dos puntos porcentuales hasta cumplir con la meta del 30% para generadores RCD en obras privadas, mientras que para obras públicas la meta inicial es del 10%, y se completará hasta el 30% con un incremento gradual de dos puntos porcentuales, la vigencia del presente decreto fue desde su fecha de emisión en diciembre de 2018, derogando al Decreto 0291 del 2005; facultando al Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) como ente de control.

2.2 Gestión de los RCD

La disposición de residuos de construcción y demolición es cada vez mayor y más difícil de controlar para los gobiernos, debido a factores ambientales y técnicos, por este motivo se busca soluciones a esta problemática como la reutilización de estos materiales, debe considerarse que no solo se trata de obtener beneficios ambientales, sino también la exigencia de requisitos técnicos para el sector de la construcción.

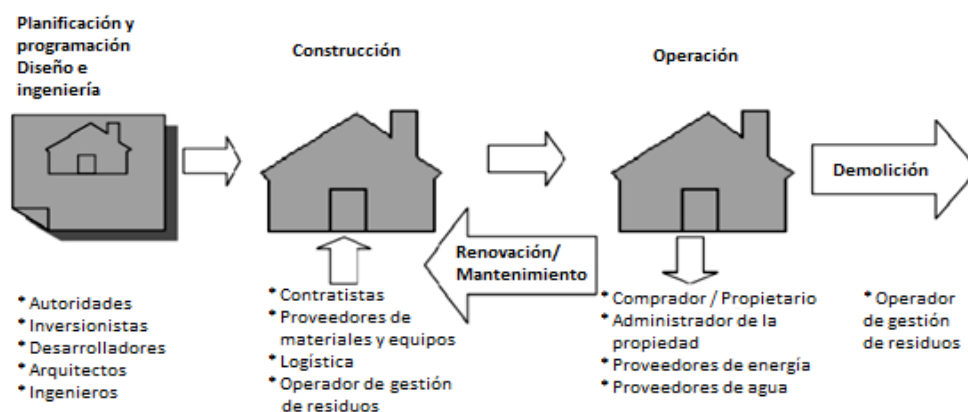


Figura 3. El ciclo de vida de las edificaciones, Brick (2008)

El ciclo de vida de las edificaciones Figura 3, citado por Suzuki et al. (2010) en Eco²Cities un diagnóstico para el Banco Mundial, describe los actores que intervienen en cada etapa; entre estos los operadores de gestión de residuos, enfocándose en las fases de construcción, renovación o mantenimiento, y demolición al final de la vida útil. Sin embargo, se busca que la gestión de

residuos de construcción y demolición acompañe el proceso desde el diseño, que es la etapa donde se toman decisiones como las metodologías constructivas y materiales a ser empleados, este es el punto desde el cual se puede planificar y prever la generación.

Con el fin de preservar el medio ambiente y garantizar una gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la Resolución N°0472-2017, exige la incorporación en obra de residuo de construcción y demolición aprovechable, con la meta de reutilización del 30% en peso, del total de los materiales usados. Las leyes como esta tratan de minimizar y controlar la generación. Sin embargo, es difícil de seguir y cumplir la legislación existente, cuando no hay herramientas para controlar la cantidad de residuos de construcción producida (Solís-Guzman, Marrero, Montes, & Ramírez, 2009).

2.2.1 Clasificación del RCD

Dentro del marco de la gestión el primer paso es el análisis de la generación de RCD en los proyectos asociado a su sistema constructivo, para lo que se requiere establecer una clasificación, que puede ser adoptada o desarrollada para la región o país. A continuación, se muestran las clasificaciones más usadas:

I. *Lista Europea de Residuos*

De acuerdo con la lista Europea de Residuos, EWL por sus siglas en inglés, en su Capítulo 17 establece la clasificación de los residuos del sector de la construcción y demolición, asociando a cada residuo con un código de referencia para su gestión, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista Europea de Residuos (EWL, por sus siglas en inglés)

17	Residuos de la Construcción y Demolición [incluida la tierra excavada de zonas contaminadas]
<i>1701</i>	<i>Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.</i>
170101	Hormigón.
170102	Ladrillos.
170103	Tejas y materiales cerámicos.
<i>1702</i>	<i>Madera, vidrio y plástico.</i>
170201	Madera.
170202	Vidrio.
170203	Plástico.
<i>1703</i>	<i>Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitrinados.</i>
<i>1704</i>	<i>Metales [incluidas sus aleaciones].</i>
170401	Cobre, bronce, latón.
170402	Aluminio.

17	Residuos de la Construcción y Demolición [incluida la tierra excavada de zonas contaminadas]
170403	Plomo.
170404	Zinc.
170405	Hierro y acero.
170406	Estaño.
170407	Metales mezclados.
1705	<i>Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.</i>
1706	<i>Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.</i>
1708	<i>Materiales de construcción a partir de yeso.</i>
170802	Materiales de construcción a partir de yeso distintos de los especificados en el código 170801.
1709	<i>Otros residuos de construcción y demolición.</i>
170903	Otros residuos de construcción y demolición [incluidos los residuos mezclados] que contienen sustancias peligrosas.

Fuente: Comisión Europea (2014).

II. Clasificación Brasileña:

Mediante la resolución N°307 la Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA (2002), organismo regulador en Brasil, los residuos de construcción se catalogan de la siguiente forma:

- Clase A - son los residuos reutilizables o reciclables como agregados, tales como:
 - a. Construcción, demolición, remodelación y reparación de pavimentos y otras obras de infraestructura, incluyendo el suelo de movimiento de tierras.
 - b. Construcción, demolición, remodelación y reparación de edificios: componentes cerámicos (ladrillos, placas, baldosas, etc.), mortero y hormigón.
 - c. Proceso de fabricación y / o demolición de elementos prefabricados de hormigón (bloques, tubos, bordillos, etc.) producidos en obras de construcción.
- Clase B - son residuos reciclables a otros destinos como: plásticos, papel / cartón, metales, vidrio, madera y otros.
- Clase C - son los residuos para los que no se han desarrollado las tecnologías o aplicaciones económicamente viables que permitan su reciclaje / recuperación, tales como productos del yeso.
- Clase D - desechos peligrosos derivados del proceso de construcción, tales como pinturas, disolventes, aceites y otros contaminados o los procedentes de demoliciones,

remodelaciones y reparaciones de las clínicas de radiología, instalaciones industriales y otros. Estos nuevos residuos, no siempre son fáciles de descartar. Es posible que se vuelvan aún más agresivos para los seres humanos y el medio ambiente, en función de su riesgo y complejidad, pueden causar nuevos problemas tales como la imposibilidad de ser reciclados, la falta de tecnología para su tratamiento, la falta de lugares para su eliminación y todos los gastos que esto causaría (Bueno et al., 2013).

III. Clasificación Colombiana

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017), detalla en la Resolución 0472 la nueva clasificación vigente en Colombia para los residuos de construcción y demolición separados en dos grupos:

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

IV. La Norma Europea UNE-EN 933-11 (2010)

Establece los ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, en su parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados, mostrado en la Tabla 3. Se considera en la presente investigación ya que aunque no sea una clasificación de

residuos como tal, puede ayudar a la gestión de los mismos con el enfoque a su uso potencial como agregado.

Tabla 3. Composición de los áridos gruesos reciclados

Componente	Descripción
Rc	Hormigón, productos de hormigón, mortero, elementos de albañilería de hormigón
Ru	Áridos no ligados, piedra natural, árido ligado hidráulicamente
Rb	Elementos de albañilería de arcilla, de silicato cálcico y hormigón aireado no flotante
Ra	Materiales bituminosos
Rg	Vidrio
X	Arcilla, tierra, yeso, plástico, madera y otros
FL	Materiales flotantes

Fuente: UNE-EN 933-11 (2010)

2.2.2 Índices de generación

El siguiente paso para la correcta gestión del residuo de construcción y demolición es la determinación de su generación real. La cantidad y las características del residuo dependerán de las condiciones específicas de cada proyecto, como el área de construcción, los materiales utilizados en la obra, el método constructivo, la calidad de mano de obra, etc.

El análisis de la generación de residuos de la construcción es fundamental cuando se desea utilizarlos como reemplazo parcial o total de la materia prima en la fabricación de componentes para la construcción. La tasa de pérdida alta del proceso constructivo es la principal causa de los desechos generados, aunque no todas las pérdidas se convierten efectivamente en una pérdida, debido a que algunos terminan en la propia obra, la tasa promedio de pérdida debe proporcionar una idea clara de cuánto se desperdicia en materiales de construcción (Bueno et al., 2013). Hay muchas maneras de hacer una estimación de los residuos de construcción y demolición generados en obra. Por ejemplo:

- En Países Bajos, un estudio aplicó una metodología según la cual se deduce que alrededor del 1 al 10% en peso de los materiales de construcción comprados, dependiendo del material, dejan el sitio como residuo, la cantidad promedio es de 9 % (Bossink & Brouwers, 1996).
- En Brasil, otro estudio determina la generación según la tasa de pérdida en la actividad de construcción que va entre el 20 al 30 % del peso total del material de la obra (Pinto & Agopayan, 1994).

- En el Reino Unido, el Instituto de Investigación británica ha desarrollado un método para cuantificar el residuo producido en obra, llamado SMARTWaste. Esta herramienta proporciona puntos de referencia que permiten estimar la cantidad generada en proyectos de nueva construcción. Los datos utilizados para producir estas estimaciones se han extraído de proyectos anteriores introducidos en el sistema (Mália, Brito, & Bravo, 2011), además permite llevar el registro de generación tanto en volumen como en peso.
- Otro método utilizado en España y más generalizado, es en el que se obtiene el volumen por unidad de superficie de los residuos generados en la actividad de la nueva construcción y la demolición de los edificios (Mañá, González, & Sagrera, 2000).

Los índices se pueden considerar entonces como un global de la generación producida, o determinarse en las diferentes fases de construcción: excavación, estructura, mampostería y acabados; relacionando de manera eficiente los residuos a las actividades en obra que los generan. Además, pueden diferenciarse: los índices de estimación de la generación, que se usan principalmente para dar una referencia de la cantidad de residuos esperada de la ejecución de un proyecto; y los índices de generación en obra que los obtendremos de los datos reales durante la ejecución del proyecto y que luego aportaran a mejorar los índices de estimación. Según esto se muestra a continuación algunos índices de estimación y metodologías para la obtención de índices, elaborados en investigaciones particulares o por entidades gubernamentales, involucradas en la gestión de residuos de construcción y demolición.

I. Índices generales

Son aquellos índices globales expresados en volumen o peso, generalmente se establecen en función del área de construcción, tipo de construcción y pueden o no clasificar los residuos de forma general. Tenemos por ejemplo en las Tablas 4 y 5:

- En peso:

Tabla 4. Cantidad de RCD producidos (kg/m²)

Tipo de Construcción	RCD producido (kg/m² construido)
Obras edificios nuevos	120,00
Obras de rehabilitación	338,70
Obras de demolición total	1.129,00
Obras de demolición parcial	903,20

Fuente: Gobierno Andalucía/Agencia de Obra Pública, AGRECA, PAIDI, & Enresa (2013)

- En volumen:

Tabla 5. Producción de RCD (m³/m²) en la demolición de un edificio de uso residencial

Naturaleza del RCD	IHOBE	ITeC	Comunidad de Madrid
No pétreo	0,064	0,0112	0,14
Pétreo	0,819	0,9425	0,75
Residuos peligrosos	0,002	0,0153	0,11
Total	0,895	0,9690	1,00

Fuente: Gobierno Andalucía/Agencia de Obra Pública et al. (2013)

Estos índices sirven como base para la estimación general de la cantidad de residuos que se espera de un proyecto tanto de construcción como de demolición.

II. Índices intermedios

Compuestos habitualmente de índices globales de volumetría de residuos en base a la superficie construida del proyecto, el tipo de obra (construcción o demolición) y uso de la edificación (residencial, industrial), y vinculada a ese índice global una tabla que corresponde a índices para cada tipo de residuo de construcción.

- Gobierno Vasco: Los índices utilizados para el cálculo del volumen de residuo de construcción y demolición en el Decreto Vasco son los que utiliza Ihobe para conocer el volumen global de residuos generados; en la Tabla 6 se muestra como ejemplo los índices correspondientes a “obra nueva de edificio residencial”, en esta se proporciona datos para el cálculo de la generación tanto en volumen como en peso, esos índices están sujetos a progreso técnico y se irán perfeccionando en el tiempo (Ihobe SA/Gobierno Vasco, 2012).

Tabla 6. Índices de estimación de generación de RCD para obra nueva de edificio residencial

Código LER	Tipo de RCD Descripción	Ratio m ³ /m ²	Ratio ton/m ²
170101	Hormigón	0,026047	0,036464
170102/170103	Ladrillos, tejas, cerámicos	0,040704	0,036634
1704	Metal	0,001799	0,000648
170201	Madera	0,014487	0,003622
170203	Plástico	0,010354	0,001584
150101	Papel y Cartón	0,011875	0,000831
1702802	Yeso estructural	0,00972	0,003927
170904	Otros residuos No Peligrosos	0,000778	0,000314
170903	Otros residuos Peligrosos	0,002186	0,00011
Total		0,11795	0,084134

En este caso, la clasificación adoptada por el organismo para la categorización de los residuos es la Lista Europea de Residuos (EWL, por sus siglas en inglés). Fuente: Ihobe SA/Gobierno Vasco (2012).

III. Índices detallados

Son de gran utilidad cuando lo que se busca es hacer la relación directa entre las actividades ejecutadas y los residuos específicos generados.

Llatas (2011), realiza un análisis detallado del origen de los residuos de construcción y demolición, y aunque mantiene como clasificación general la codificación propuesta por la Lista Europea de Residuos, hace una distinción entre los provenientes de empaques de materiales, el residuo producto del proceso constructivo en sí, y el material de excavación. Además, propone la estimación de la generación de los residuos de construcción específicamente por elemento o actividad de obra. Se diferencian para el cálculo el uso de factor de residuo de embalaje (F_p), factor de desperdicio (F_r), factor de suelo (F_s), factor de conversión (F_c), factor de incremento del volumen (F_i). En la Tabla 7 se presenta un ejemplo de los residuos esperados en la ejecución de un sumidero, tomando como referencia el cemento, se especifica la generación de concreto como residuo de la actividad constructiva, además de cartón y pallet de madera como residuo del embalaje propio del material.

Tabla 7. Desperdicio esperado en la ejecución de un sumidero de 51 x 51 x 100 cm

Material de construcción	Cantidad Q	Factores			Residuo Generado		
		$F_p/F_r/F_s$	F_c	F_i	V (m^3)	Código EWL	Tipo de residuo
m ³ Mortero	0,112	0,0300	1,0000	1,1000	0,004	17 01 01	Concreto
m ³ Concreto	0,129	0,0600	1,0000	1,1000	0,009	17 01 01	Concreto
m ³ Arena	0,303	0,0100	1,0000	1,0000	0,003	17 05 04	Agregado
t Cemento	0,060	0,0100	0,6666	1,0000	0,000	17 01 01	Concreto
	0,060	0,7500	1,0000	0,0250	0,001	15 01 01	Cartón
	0,060	0,0250	1,0000	1,1000	0,002	15 01 03	Pallet de madera
m.u Ladrillo	0,176	0,0500	1,0000	1,2500	0,011	17 01 02	Ladrillo
	0,176	0,2500	1,0000	1,1000	0,048	15 01 03	Pallet de madera
	0,176	0,0160	1,0000	2,0000	0,006	15 01 02	Plástico
u Material	0,057	0,0100	1,0000	1,0000	0,001	15 01 06	Embalaje mixto
Auxiliar	0,027	0,0100	1,0000	1,0000	0,000	17 09 04	Residuo mixto
u Sumidero	1,000	0,7873	1,0000	1,2000	0,945	17 05 04	Suelo

Fuente: Llatas (2011).

Los diferentes índices mostrados pueden darnos una visión clara de los parámetros de detalle en la separación de residuos que queremos llevar a cabo para la gestión en obra, además estos índices generados por organismos o gobiernos para las condiciones específicas de su medio, pueden servir de referencia para establecer la comparación entre nuestra generación y los estándares internacionales.

2.2.3 Planes de gestión

La gestión integral de residuos de construcción y demolición es el conjunto de actividades dirigidas a prevenir, reducir, aprovechar y disponer finalmente los residuos. Los planes de gestión son el medio a través del cual esas actividades se llevan a cabo en las obras; estos se deben formular, implementar y mantener actualizados para asegurar la separación y tratamiento adecuado de los residuos generados. A continuación, se resumen algunas guías para la gestión de residuos de construcción y demolición, que pueden servir como punto de partida para la conformación de un plan integral de residuos, que se adapte a las condiciones y capacidades del sector constructivo local.

I. Gestión y tratamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) Guía de buenas prácticas

Esta guía desarrollada por el Gobierno Andalucía/Agencia de Obra Pública, RCD, PAIDI, & Enresa (2013), tiene por objeto dar a conocer las obligaciones de cada uno de los agentes que intervienen en la gestión de los residuos de construcción y demolición, y divulgar las buenas prácticas en la gestión que se deben llevar a cabo en las plantas de tratamiento, destacando la importancia de la selección en el origen; puntos clave si se planea realizar aprovechamiento en obra. Se incluyen diagramas de flujos y documentos a emplear por los agentes involucrados en la gestión de los RCD para el cumplimiento de sus obligaciones.

Figuras involucradas en la producción y gestión de RCD

- Persona o entidad productora de RCD: es la persona física o jurídica titular de la licencia de obras (público o privado); estos son considerados productores iniciales de residuos. También tienen la consideración de productor cualquier persona física o jurídica que efectúe operaciones de tratamiento previo, y ocasionen un cambio de composición.
- Persona o entidad poseedora de RCD: es la persona física o jurídica que tenga en su poder los RCD y que no ostente la condición de gestor de residuos. Será el titular de la empresa que ejecute la obra de construcción o demolición, tales como el constructor, los subcontratistas. En la Figura 4 se muestra las principales obligaciones de los productores y poseedores de residuos de construcción y demolición.

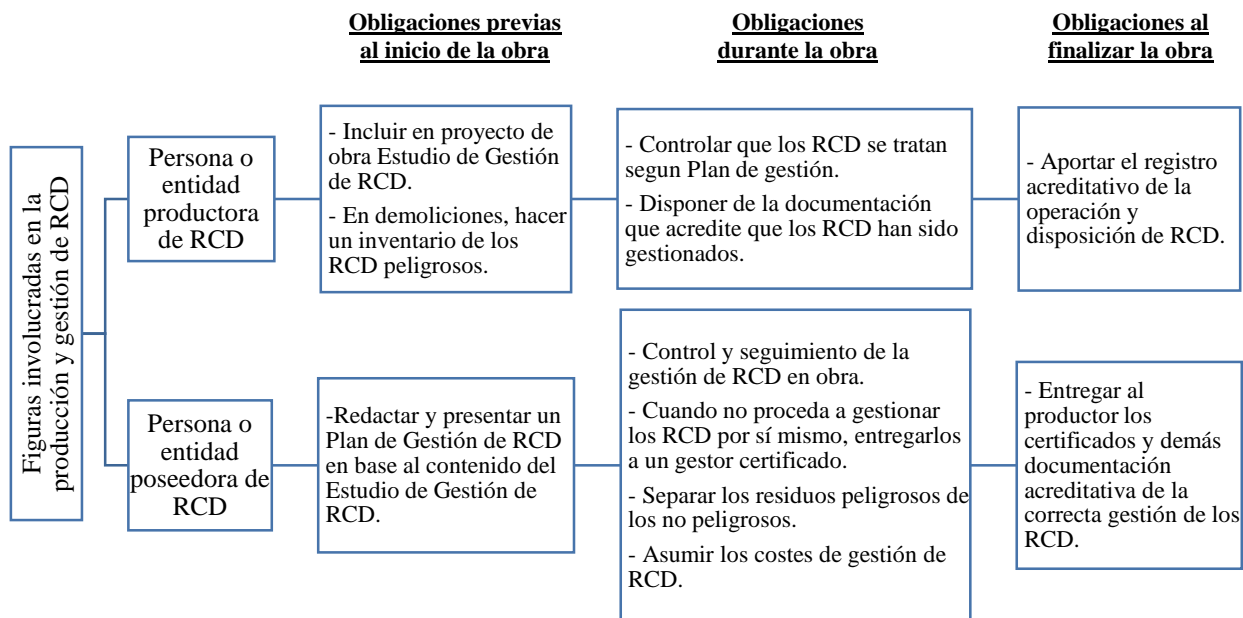


Figura 4. Resumen de obligaciones de productores y poseedores de RCD, Gobierno Andalucía/Agencia de Obra Pública et al. (2013)

- Transportista de residuos: toda persona física o jurídica que recoja o transporte residuos con carácter profesional. Sólo podrán realizar la recogida y el transporte de los RCD las personas o entidades transportistas que dispongan de un contrato vigente con personas o entidades productoras o gestoras. Todo traslado de RCD deberá ir acompañado de un documento de identificación, a los efectos de seguimiento y control, en el caso de residuos no peligrosos será la carta de porte u otro documento que acredite el origen y el destino de los residuos.
- Persona o entidad gestora de RCD: es la persona o entidad, pública o privada, registrada mediante autorización o comunicación, que realice cualquiera de las operaciones que componen la gestión de los residuos, sea o no la productora de los mismos. Realmente se trata de los gestores titulares de plantas de tratamiento y vertederos. Las operaciones de gestión incluyen la recogida, el almacenamiento, el transporte y el tratamiento de los residuos de construcción y demolición, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como la clausura y mantenimiento posterior del cierre de los vertederos. Sus principales obligaciones se resumen en la Figura 5.

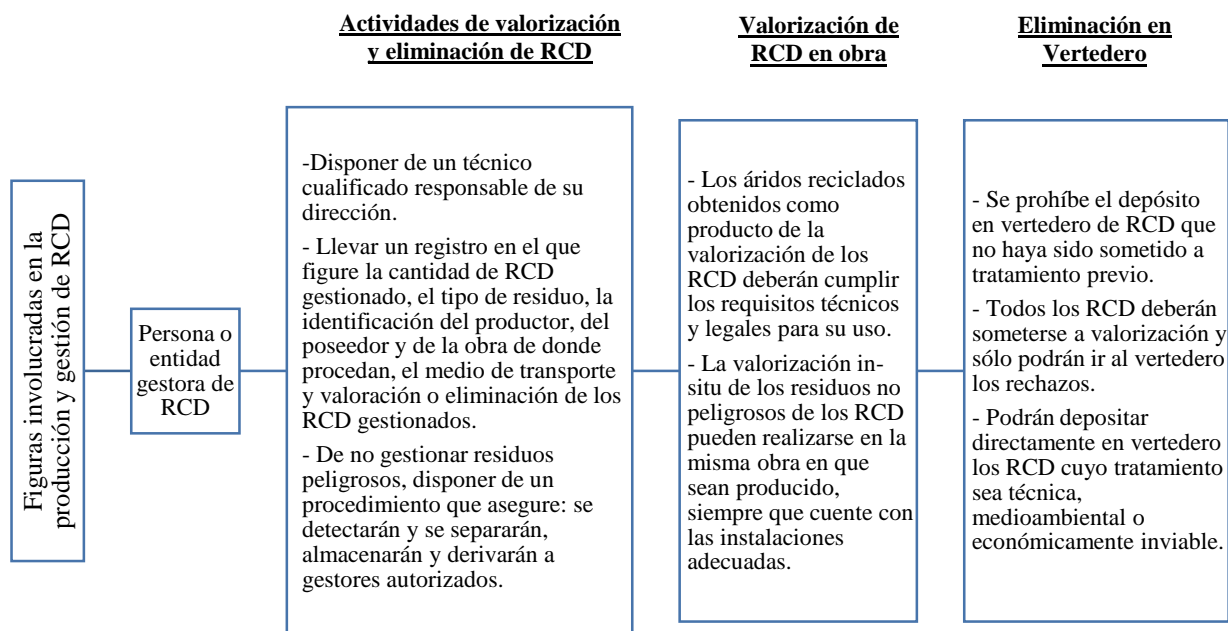


Figura 5. Resumen de obligaciones de gestores de RCD, Gobierno Andalucía/Agencia de Obra Pública et al. (2013)

Origen y producción de RCD

El tratamiento de los residuos de construcción y demolición no debe comenzar en la planta de tratamiento sino desde su producción, en el momento de deconstrucción o demolición en las mismas obras de ingeniería e edificación.

- Controlar la gestión y destino: El poseedor de residuos, cuando no proceda a gestionarlos por sí mismo, estará obligado a entregarlos a un gestor de residuos.
- Controlar la separación: El poseedor de los residuos debe mantenerlos en condiciones adecuadas de higiene y seguridad evitando la mezcla de fracciones ya seleccionadas. En el caso de obras de derribo la mejor opción es la demolición selectiva, mientras que en obras de construcción es recomendable la separación de los residuos in situ.

Por otro lado, para una adecuada gestión y control de los RCD generados, es necesario disponer de datos de producción aplicables a cada obra, en función de sus características. Esto permitirá establecer volúmenes de producción de los distintos tipos de residuos, su coste y el destino de cada uno de ellos.

II. Gestión diferenciada de residuos de construcción - un enfoque medioambiental

El libro de Karpinsk et al. (2009), publicado por la Pontificia Universidad Católica de Río Grande del Sur contiene directrices para el desarrollo de un modelo de gestión de residuos de construcción y demolición a nivel de los municipios de Brasil, con el caso específico del Municipio de Passo Fundo-RS, aun así la organización del modelo, herramientas propuestas y sugerencias, podrían ser aplicables a los fines de este trabajo de investigación; en ese contexto a continuación se detalla la estructura del Modelo de Gestión modificado.

- Diagnóstico de la situación actual del proyecto:

La primera fase tiene la finalidad de realizar un diagnóstico de la situación de los residuos de construcción y demolición, se realiza una investigación de campo para identificar el lugar de disposición regular de los residuos, si se lleva a cabo algún registro de datos sobre los mismos, información sobre la cantidad y origen. Esto crea la necesidad de contacto con los diferentes actores del proceso constructivo, a través de entrevistas como herramienta para este primer acercamiento.

- Análisis de la generación de residuos de construcción y demolición:

Inicialmente se puede obtener una visión global del volumen de residuos generados en obra a través del número de viajes despachados, que suele ser el registro más común llevado a cabo dentro de los proyectos. Sin embargo, es necesaria la recolección y análisis de información específica sobre la generación, muy valiosa para el desarrollo de los siguientes puntos.

- Definición de los agentes involucrados y sus responsabilidades:

Los agentes involucrados en el Plan Integrado de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición son principalmente: el director de obra a cargo de la totalidad del proyecto, su logística, provisión de materiales y maquinaria, el residente de obra a cargo de impartir directrices y controlar la buena ejecución de las actividades, y los generadores de residuos al interior del proyecto (Cuadrillas de trabajo, contratistas, etc.). Jerárquicamente estos deben ser los niveles comprometidos en la implementación de la gestión de residuos, haciendo énfasis en que el peso de la gestión cae principalmente en los generadores al interior del proyecto, así como la adopción de los métodos y técnicas que estén de acuerdo con los objetivos establecidos por la empresa.

- Definición de las directrices:

En el Plan Integrado de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición debe constar el Programa de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición y todos los procedimientos necesarios para su funcionamiento, así como su continuidad; debiendo ser seguidas directrices básicas que velen por la competencia en el cumplimiento de las acciones citadas.

- Construir los procedimientos del Programa de Gestión:

El Programa de Gestión debe ser elaborado, implementado y coordinado, estableciendo directrices técnicas y procedimientos para el ejercicio de las responsabilidades de los actores en el proceso, pero principalmente de los generadores al interior de la obra, de conformidad con los criterios del sistema de limpieza del proyecto o la constructora. Para garantizar el correcto destino de los residuos se pueden seguir las etapas presentadas:

- a. Clasificar los tipos de residuos producidos, adoptando la clasificación de la Resolución 307/02 del CONAMA.
- b. Estimar la generación media semanal de residuos por clase y tipo (en Kg o m³).
- c. Describir los procedimientos a ser adoptados durante la obra para la cuantificación diaria de los residuos generados por clase / tipo de residuo.

- Determinar las áreas de disposición de residuos:

Se deberán indicar los lugares de destino para cada clase / tipo de residuo y el responsable de su destino o disposición interna (propio generador, o actor encargado). Las áreas deben ser coordinadas y autorizadas por el director de obra de forma que no interfieran con la logística del proyecto.

- Prohibir la disposición de los RCD en áreas no autorizadas:

Se debe prohibir la disposición de residuos de construcción en áreas no autorizadas dentro del proyecto, es necesaria la fiscalización de forma organizada y sistematizada para poder acompañar la evolución de alguna posible deposición, previendo multas de ser el caso.

- Fomentar la re inserción de los residuos reutilizables o reciclados en el ciclo productivo:

La pérdida, desperdicio o sobrante de materiales en una actividad constructiva puede incorporarse o reutilizarse dentro de la obra, todo depende de la disposición que se le haya

dado después de su generación; el caso más común es que terminen en pilas de escombros y se contaminen; pero con la gestión se busca que al darles una buena disposición estos estén disponibles para su uso, se requiere entonces evaluar dos aspectos:

- a. Describir los procedimientos a ser adoptados para minimizar la generación de los residuos sólidos por clase, realizando la separación de los residuos.
 - b. Describir los procedimientos a ser adoptados para el acondicionamiento de los residuos sólidos por clase / tipo, para garantizar la integridad de los materiales.
- Definir criterios para la recolección de los residuos:
Identificar y registrar a los responsables de la ejecución de la recolección y del transporte de los residuos generados: los tipos de vehículos y equipos a ser utilizados, la frecuencia y el itinerario.
 - Realizar acciones de orientación y educación para los agentes involucrados:
Realización de un plan de acciones que tenga como objetivo principal la orientación para los agentes involucrados. En cada reunión se puede utilizar una especie de registro sistemático de las acciones de orientación y control, emprendidas de manera que hacen posible la evaluación periódica de su eficacia y perfeccionamiento. Este puede ser el Plan de Comunicación y Educación Ambiental, que debe contener algunas acciones de educación ambiental para los trabajadores de la construcción civil. Para iniciar los trabajos con los empleados es necesario abordar el tema promoviendo conferencias y seminarios, en que se subrayan las metas de minimización, reutilización y separación de los residuos de construcción y demolición en su origen. Esta comunicación debe ser realizada periódicamente, por medio de carteles, murales, llamadas en la obra, y no necesita ser necesariamente de residuo de construcción civil. El empleado acabará pensando de modo ecológicamente correcto en toda su jornada, pues el beneficio es para su vida.
 - Realizar acciones de fiscalización y de control de los agentes involucrados:
Después de realizado el proceso de gestión de los residuos de construcción y demolición, se debe implantar un programa de fiscalización. Este debe garantizar el funcionamiento de las acciones propuestas, siendo un importante instrumento de gestión.

III. Manual para la redacción de estudios de gestión de RCD en obras de edificación, rehabilitación y demolición

Este manual desarrollado por Ihobe SA/Gobierno Vasco (2012), se complementa con un manual para la redacción e implementación del plan de gestión de residuos de construcción. La función del estudio es establecer las pautas y objetivos en materia de gestión de residuos desde la concepción del proyecto, mientras que el plan detalla la forma como se llevaran a cabo dichos objetivos. Lo interesante de esta propuesta es que, al estar enfocada desde el diseño del proyecto, hace una estimación de la generación esperada, establece desde ese punto las instalaciones para la gestión, y la partida presupuestaria necesaria para implantar el plan de gestión.

- Actores y responsabilidades:

Incluye las responsabilidades detalladas en cada fase de la obra, para el promotor o diseñador y el contratista.

- Estimación de residuos de construcción y demolición:

En la etapa de diseño se realiza una estimación de los residuos que se generarán en la obra. Dicha estimación se medirá en peso [ton] y en volumen [m³] e incluirá el código europeo de cada tipo de RCD. Se establece 3 herramientas para esta estimación: Los índices generalistas, módulos de software y hojas de cálculo propias basadas en datos de experiencias previas.

- Medidas para la prevención:

En función del tipo de obra y del nivel de exigencia que se quiera establecer en materia de gestión, se esbozan objetivos de prevención de la generación, se da como referencia medidas de minimización de embalajes, materiales de mayor peso en el presupuesto, y residuos peligrosos.

- Operaciones de reutilización, valorización o eliminación:

En base a la estimación de residuos, se debe decidir qué tipo deberá separarse obligatoriamente en origen, y en base a las características de la obra, estudiar la posibilidad de realizar valorizaciones in situ de RCD.

- a. Reutilización: Uso de materiales de demolición en buen estado, los cuales se vuelven a utilizar sin ser transformados.

- b. Valorización: Uso de residuos de construcción o demolición para ser aprovechados de alguna forma dentro o fuera de la obra, evitando que sean enviados a un vertedero.
 - c. Eliminación: Envío de los residuos a un vertedero.
 - d. Reciclado: Operación de valorización que implica la transformación del residuo.
- Medidas para la separación obligatoria en el origen:

La separación obligatoria en el origen (SOO), es la base fundamental de todo de la gestión. Una correcta SOO garantizará el éxito, mientras que, si no se separan correctamente los residuos, el plan de gestión pasará a ser otro informe a añadir a la documentación de la obra. Las bases que establecen la SOO incluyen tres aspectos:

- a. Formación e Información: requisitos mínimos que el contratista debe cumplir tanto en materia de formación a sus trabajadores y subcontratas como de información a través de anuncios, señalizaciones y carteles de obra.
 - b. Supervisión y Control: trabajo de supervisión y control de la buena conducta de los trabajadores en la obra para garantizar la correcta SOO.
 - c. Contenedores y sistemas de acopio: utilización de sistemas de acopio tanto para recoger los residuos, acumularlos en el perímetro de la obra en contenedores que son posteriormente evacuados, así como establecer requerimientos para el acopio y la protección de los RCDs. Estos requerimientos normalmente hacen referencia a los residuos peligrosos.
- Instalaciones para la gestión de residuos de construcción y demolición:

El esquema de gestión de residuos (EGR), debe proponer una solución para resolver los problemas de acopio, logísticos y operativos para la gestión, pueden ser instalaciones o áreas provisionales puesto que a medida que la obra se va desarrollando, los espacios habilitados para diferentes instalaciones se pueden ver afectados por actividades constructivas y pueden ir cambiando.

- a. Almacenamiento: En este punto definiremos los criterios que se podrían utilizar para definir la localización de los emplazamientos de almacenamiento tanto de RCD (peligrosos y no peligrosos) como de materiales de obra.

- b. Logística: El EGR debería proponer los sistemas logísticos que serán necesarios para el traslado de los residuos en obra. Los RCD necesitan ser transportados desde sus puntos de origen hasta los contenedores del gestor. Normalmente las máquinas o vehículos que se utilizan para tal propósito son los mismos que los que se utilizan para la introducción de materiales en obra.
- c. Tratamiento: En caso de llevar a cabo una reutilización de RCD (áridos, etc.) o un tratamiento de éstos por medio de plantas de reciclaje móviles, también se deben indicar sobre plano emplazamientos adecuados para dichas actividades

El objetivo final de este apartado es contabilizar los medios necesarios para cumplir con los objetivos establecidos en el estudio.

- Prescripciones Técnicas:

En base a los objetivos establecidos se debe incluir todas las prescripciones técnicas (procedimientos) que directa o indirectamente afecten la gestión, básicamente en cuanto a su manejo, separación y transporte.

- Partida Presupuestaria:

Los recursos económicos necesarios para implantar el plan de gestión de residuos (PGR) dependen de este capítulo y es por ello que su acuerdo entre promotor y constructor es fundamental para el éxito. Aunque normalmente existe cierta tendencia a considerar que la partida para la gestión solamente debe incluir el transporte y depósito de residuos, existen otros conceptos igualmente importantes a incluir y que constituyen los costes reales asociados a la gestión, como se muestra en la Figura 6, y necesarios para el cumplimiento de la ley.

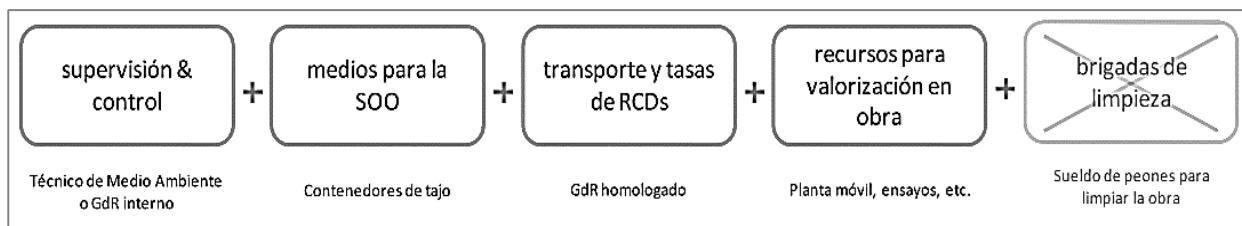


Figura 6. Modelo de presupuesto para el EGR, Ihobe SA/Gobierno Vasco (2012)

IV. Gestión de residuos en la construcción: reducción, reutilización y reciclado

Esta guía se desarrolla a través de un convenio entre los gobiernos de Brasil y Alemania por medio del proyecto COMPETIR (2006), que busca ayudar a mejorar la competitividad de las empresas, pues se basa en el enfoque de las 3R, Reducir, Reutilizar y Reciclar, haciendo énfasis en el análisis de pérdidas en la construcción y específicamente en las que generan residuos.

Pérdidas en la construcción civil

Las pérdidas son las tareas innecesarias que elevan costos sin añadir valor al producto, pudiendo eliminarse sin perjudicar el trabajo efectivo. La clasificación establecida en la guía resalta las pérdidas directamente responsables de la generación, como pérdidas por fabricación de ítems defectuosos, sobreproducción, mantenimiento de stocks, y el procesamiento en sí.

En la industria de la construcción, algunos factores contribuyen negativamente al aumento en el volumen de residuos generados. Es una industria antigua, en la cual, el trabajo manual es la base de la actividad productiva y se organiza en torno a especializaciones. Además, cada producto es único y normalmente no seriado; el producto es fijo y los obreros son móviles, dificultando la organización y control; y se trata de una industria muy tradicional, que presenta mucha inercia a las alteraciones.

Directrices para el gerenciamiento del RCD

La presente metodología toma como base para la clasificación de los residuos la especificada por CONAMA en la resolución 307, que además exige que los generadores deben tener como objetivo prioritario la no generación de residuos y, secundariamente, la reducción, la reutilización, el reciclaje y el destino definitivo.

- **Organización, Limpieza y Separación de Residuos:**

La organización, la limpieza y la separación de residuos están directamente relacionadas con la cuestión de pérdidas, tanto de materiales, como de mano de obra. Al promover una adecuada limpieza y separación de los residuos se logra reducir enormemente los índices de pérdida en obra, pues:

- a. El sitio de obra está más limpio y organizado
- b. Se evita la mezcla entre los insumos y los residuos, evitando que materiales nuevos sean descartados como residuo

- c. Habrá la posibilidad de reaprovechamiento de los residuos antes de la eliminación
- d. Todos los residuos que deben desecharse serán cuantificados y cualificados, lo que podrá colaborar en la identificación de posibles brotes de desperdicio.

Otro punto importante en cuanto a la limpieza de obra es la disminución de la incidencia de accidentes de trabajo proporcionada por un lugar de trabajo más seguro. Cabe señalar también que un ambiente de trabajo más limpio y organizado aumenta la satisfacción de los colaboradores, promoviendo ganancias para la empresa. En cuanto a la separación, cabe señalar que ésta debe ocurrir inmediatamente después de la generación del residuo, aún en el origen, para evitar la mezcla y la contaminación.

- Acondicionamiento de los residuos:

Después de la separación de los residuos, es necesario que éstos se envasen de forma correcta, desde la separación en los lugares de generación hasta el transporte al destino final. Hay algunos dispositivos que se pueden utilizar para este fin, entre estos tenemos:

- a. Contenedores de plástico: deben ser resistentes y pueden ser acondicionados de los propios envases de materiales. Plásticos, maderas, papeles y metales de pequeño tamaño pueden disponerse en ellos.
- b. Bolsas o sacos grandes: pueden ser utilizados en el embalaje de papeles, plásticos y otros materiales ligeros como uniformes, guantes, botas, etc. El lugar de los sacos debe ser cubierto y protegido de lluvia, ya que los residuos de papel y cartón pierden la posibilidad de reciclaje si se mojan.
- c. Estaciones: Las bahías se utilizan normalmente para el acondicionamiento de los residuos pesados como los de metal, y madera. El número de bahías así como el tipo y sus dimensiones deben determinarse de acuerdo con la necesidad de utilización de cada obra. Se pueden utilizar bahías móviles, cajones cerrados en el lateral y con tirantes permitiendo una mayor movilidad del lugar de acondicionamiento de los residuos.
- d. Cajones Estacionarios: Estos comúnmente tienen capacidad de 5m^3 . Su uso debe ser determinado de acuerdo con la necesidad de cada obra, normalmente para acondicionamiento de residuos de madera y de albañilería y concreto.

- Transporte Interno de los residuos:

Además del acondicionamiento inicial y final es necesario prestar atención a la forma en que los residuos se transportan en el sitio. El transporte interno puede realizarse utilizando los medios convencionales y disponibles en obra. Para el transporte horizontal, pueden ser utilizados: carritos de mano, transporte manual, entre otros. Para el transporte vertical se pueden utilizar: grúa, elevador de carga, etc.

- Destino Responsable:

De acuerdo con la Resolución 307 del CONAMA los generadores también son responsables de la destinación definitiva de los residuos cuando no sean viables de reutilización o reciclaje. Por lo tanto, al retirar los residuos del sitio es necesario prestar atención a algunos puntos:

- a. Es necesario que el vehículo que se utilizará en el transporte sea compatible con la forma en que los residuos están acondicionados en la obra
- b. Se deben adecuar los equipos utilizados para la recolección y remoción de los residuos a los patrones definidos en la legislación y / o los receptores.

Los residuos deben ser enviados a su destino acompañado del CTR (Control de Transporte de Residuos), que deberá emitirse en por el generador, transportista y destinatario.

La racionalización como herramienta para la reducción de la generación de residuos

La racionalización de la construcción tiene como objetivo la optimización del proceso de construcción a través de la aplicación de algunos principios de economía. La racionalización puede definirse como un "estudio del sistema de producción establecido con base en la realidad, con el objetivo de definir mejoras", se dirige principalmente a mejorar las interrelaciones, el flujo de materiales y productos, el flujo de información, y la organización del proceso de producción. La racionalización a menudo ocurre con acciones simples, con pequeñas alteraciones en la rutina de trabajo de los obreros que producirán frutos en cuanto a la mejora del proceso constructivo, ahorro de tiempo, material y mano de obra, además de evitar muchas veces, la generación de residuos.

- Procedimiento general:

La racionalización proporciona a la empresa una reducción significativa de los tiempos y costos de las tareas y el consecuente aumento de productividad y calidad. La herramienta

PHEC es la base de la racionalización: la planificación (P) sería la elección del área de trabajo a ser analizada, en la fase de acción (H) todo lo que se ha planificado se pone en práctica y se prueba; la evaluación (E) de los resultados orientará las posibles correcciones de la planificación inicial (C).

- Los tiempos de racionalización:

En muchas situaciones de estudio de mejora en obras es posible que sólo una persona sea capaz de identificar y proponer modificaciones en el proceso. Tendría como función observar sistemáticamente las posibles situaciones pasibles de mejora, identificar problemas, analizar las causas, seleccionar las soluciones, establecer un cronograma de acciones, y control; registrando siempre las situaciones anteriores y las actuales mejoradas. Es importante subrayar que las ideas y conocimientos de todos deben ser aprovechados. En general, los operarios de producción son capaces de presentar rápidamente y sin esfuerzo, soluciones creativas y apropiadas que pueden disminuir costos, evitar el re-trabajo, aumentar la calidad, mejorar la motivación para la productividad.

- Desarrollo de la metodología:

La metodología a ser aplicada, se constituye básicamente de cinco etapas: observar, medir, esbozar, pensar y corregir. La experiencia comprueba que la gran herramienta de la racionalización es pensar, detenerse ante una determinada situación y no tener miedo de atreverse. El proceso analizado será observado, se efectuarán las mediciones necesarias, el tiempo empleado en cada proceso, las distancias recorridas, el número de personas y máquinas involucradas. El flujo del trabajo se registrará en un bosquejo que servirá para el análisis. A continuación, se introducirán correcciones y ajustes en el proceso que será nuevamente observado y medido para comparaciones de resultados. Se define ciclo de trabajo al conjunto de acciones con inicio y término bien caracterizado que se repita en la ejecución de determinado proceso; el estudio deberá atenerse al análisis de un ciclo pudiendo evaluar diversos ciclos del mismo proceso para que los resultados sean representativos. Esta guía propone varios formularios para aplicación de la metodología, así como un ejemplo de aplicación.

V. *Guía para la elaboración del plan de gestión de residuos de construcción y demolición - RCD en la obra*

En su tercera edición esta guía elaborada por la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. / Secretaria Distrital de Ambiente, 2015; representa la principal herramienta disponible en el ámbito nacional para la elaboración de planes de gestión de RCD. Enlazada a un aplicativo web de la Secretaria Distrital de Ambiente, dicha guía cuenta con su propia clasificación de los residuos de construcción y demolición, así como de formatos de registro enfocados al reporte mensual de la generación y/o aprovechamiento de los RCD en obra. Sin embargo, desde su última edición y con la entrada en vigencia de la resolución N° 0472-2017 del MADS, se crea la incertidumbre sobre las nuevas metas de aprovechamiento establecidas y las modificaciones que debería hacerse a los planes de gestión para dar cumplimiento a las mismas.

Principio rector para el aprovechamiento

El principio de jerarquía permite garantizar una gestión ambiental basada en el uso racional de materiales que eviten la generación de residuos y una eficaz gestión de los RCD. En la Figura 7 se resume la jerarquía de estos principios, que tienen por objeto reducir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción, gestión y fomentar su aplicación.



Figura 7. Jerarquía de aprovechamiento de los RCD, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C./ Secretaria Distrital de Ambiente (2015)

Medidas de gestión para los RCD en obra

El generador debe establecer en el Plan, el procedimiento correspondiente para llevar a cabo la gestión de los RCD, el cual debe ser divulgado y socializado, de tal manera que en el frente de obra todos sus colaboradores lo conozcan y puedan ejecutarlo sin incurrir en confusiones. A continuación, se presentan recomendaciones útiles para la elaboración del Plan de Gestión de RCD

- **Compra y almacenamiento de las materias primas:** Comprar la mínima cantidad de productos auxiliares a partir de criterios ecológicos, en envases retornables del mayor tamaño posible. Utilizar los productos por su antigüedad a partir de la fecha de caducidad. Evitar fugas y derrames de los productos peligrosos. Almacenar de manera adecuada los productos, separando los peligrosos del resto y los líquidos combustibles o inflamables en recipientes adecuados. Establecer en los lugares de trabajo y áreas de almacenamiento de materiales, que estarán alejadas de la circulación y de otras zonas destinadas para el acopio de residuos.
- **Excavación:** El descapote se realizará como una actividad independiente a la excavación, de tal forma que se pueda clasificar la capa de material orgánico del material inerte. Definir el volumen que se generará con la excavación. Establecer con un estudio de suelos, las clases y calidades de suelos. Realizar la valoración de estos materiales, definir las cantidades y en donde se podrían reutilizar.
- **Construcción del proyecto:** Estimar la cantidad de RCD que se generarán en cada actividad constructiva. Realizar la valoración de estos materiales para definir lo que se podría reutilizar en el proyecto. Seleccionar los espacios dentro del frente de obra para la realización del acopio, separación y clasificación de los RCD, con los respectivos contenedores y/o espacios destinados para tal fin. Definir las cantidades y tipos de materiales para disposición final y los que se llevarán a sitios de tratamiento y/o aprovechamiento. Seleccionar los sitios de disposición final, donde se llevarán los RCD. Socializar el Plan de Gestión con todos sus colaboradores y contratistas.

Procedimientos ambientales para efectuar la gestión

En este punto se describe las actividades para la reducción, separación, reutilización, reciclaje, valorización y disposición final de los residuos de construcción y demolición generados en los frentes de obra.

- Procedimiento para la reducción de la generación de los RCD: Las acciones o estrategias que se propongan para la reducción óptima de los RCD resultan menos eficientes, si se aplican en obras que carezcan de una programación racional de la gestión de los residuos generados. Es por eso que se recomienda conocer antes de iniciar el procedimiento de reducción los tipos de residuos que se van a generar, con el fin de asignarle una clasificación y poder así proyectar el proceso de reducción.
- Procedimiento para la separación en la fuente de los RCD: Este procedimiento garantiza un resultado favorable en el proceso de gestión para el manejo integral de los RCD, por medio de la separación y recolección selectiva de los residuos, ya que representa ganancias económicas al generador y pueden ser comercializados. Es indispensable reconocer cuáles son los tipos de materiales que se pueden reutilizar o reciclar, para poder tener una separación exitosa.
- Procedimiento para la reutilización de los RCD: El objetivo es lograr la destinación de un porcentaje de los diferentes RCD generados en una obra, a un proceso de reutilización.
- Procedimiento para el reciclaje de los RCD: Una vez se generan los residuos de construcción y demolición, ya clasificados y separados. Los materiales almacenados temporalmente en los frentes de trabajo no pueden interferir con el tráfico peatonal y/o vehicular y deben ser protegidos de la acción erosiva del agua, el aire o su contaminación con otro tipo de sustancias.
- Procedimiento para la disposición final de los RCD: establecer las estrategias necesarias para hacer un uso adecuado en la disposición final de los RCD para evitar al máximo los impactos al ambiente. Los residuos sobrantes a los que no se les haya atribuido un aprovechamiento, se deberán disponer en los sitios de disposición final de RCD autorizados.

Estructura del plan de gestión de residuos de construcción y demolición PG-RCD

A continuación, se describe la información que como mínimo debe contener el Plan de Gestión de RCD:

- Datos generales de la obra: Los aspectos que contiene este numeral van enfocados a conocer los datos de la empresa que va realizar la construcción y la información general de

la obra como: ubicación, tipo de infraestructura a construir o a demoler, superficie a construir o demoler, número de pisos, presupuestos de la obra y el PG-RCD.

- Manejo de los RCD en obra: En este numeral se debe incluir la gestión que se va a adelantar al interior de la obra para realizar el manejo de los RCD generados, incluyendo como mínimo su manejo, prevención o minimización de la generación, separación en la fuente, sitio de almacenamiento temporal en obra, clasificación, tratamiento, valorización, transporte y gestión final.
- Reporte de cantidades de material de construcción usados en la obra: El reporte de las cantidades de materiales de construcción va dirigido a conocer cuánto material se tiene programado para usar en la obra, y los datos que se solicitan desagregados por cada uno de los posibles residuos que generará el uso de esos materiales. Se debe informar sobre las cantidades prevista durante la etapa de planeación de la obra y las cantidades reales usadas mes a mes.
- Reporte de los residuos de construcción y demolición generados en obra: Enfocado a conocer la cantidad de residuos generados como resultado de la actividad constructiva; debe informarse la cantidad proyectada durante la etapa de planeación y luego mes a mes, llevando un dato acumulado de la cantidad real generada y uno de la cantidad real del mes reportado, los cuales deben corresponder a los cargados en el aplicativo web.
- Estimación de costos del manejo de RCD: El generador o poseedor de los RCD debe identificar e incluir los costos de tratamiento de los residuos de construcción y demolición de la obra y registrarlos contemplando los siguientes aspectos: tipo de residuo; estimación en m³; precio de gestión en planta (por m³), precio de disposición final (por m³), precio del gestor (por m³), costo total y porcentaje del presupuesto de la obra.
- Indicadores RCD: Estos indicadores deben ser reportados al inicio de la obra con los valores proyectados; mes a mes se deben reportar los valores reales del material usado y los RCD generados. A continuación, se relacionan los indicadores.
 - a. Indicador de eficiencia Este indicador permite conocer la inversión realizada mes a mes por parte del generador en la gestión de los RCD de la obra, con respecto a lo calculado en la fase de planeación y presentado en el Plan de Gestión de RCD.

- b. Indicador de eficacia: Este indicador permite controlar el volumen de RCD aprovechados en la obra respecto a los generados, y verificar el cumplimiento del porcentaje definido por la Resolución 1115 de 2012, de acuerdo con el año de vigencia.
- c. Indicador de Efectividad: Este indicador permite hacer el seguimiento a las cantidades generadas mes a mes de RCD y control a los datos reportados en el aplicativo web de la SDA.

2.2.4 Estrategias para la implementación de la gestión de residuos en el sitio

Según el proyecto COMPETIR et al. (2006), el proceso de implantación del programa de gestión de residuos como se muestra en la Figura 8, contempla el desarrollo de un conjunto de actividades realizadas dentro y fuera de las obras: entrenamiento inicial, planificación, implantación y monitoreo.

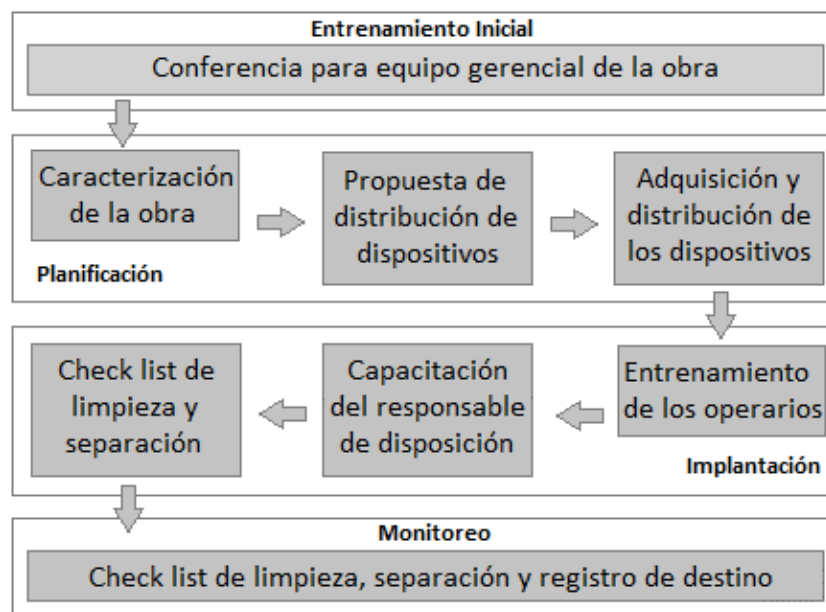


Figura 8. Etapas de implantación de la gestión de residuos, COMPETIR et al. (2006)

I. Entrenamiento Inicial

La formación preliminar llevada a cabo mediante una conferencia en presencia de la dirección de la empresa y el equipo de gestión de la obra (ingenieros, maestros, carga administrativa, responsable de la calidad, seguridad y suministros) en el que se ejecutará el programa. Esta reunión tiene por objetivos:

- Sensibilizar a los equipos sobre los impactos ambientales causados por las actividades de construcción y demolición en las ciudades
- Mostrar cómo las leyes y las nuevas directrices establecen un nuevo panorama para la gestión integrada de estos residuos y cuáles son las implicaciones para el sector
- Establecer las modificaciones que pueden ocurrir en el día a día de las obras en función de la implantación del Programa de Gestión de Residuos
- Repasar las herramientas utilizadas en el Programa de Gestión de Residuos.

II. Planificación

Esta etapa se desarrolla en el sitio buscando inicialmente caracterizar la obra a través de las siguientes informaciones:

- Cantidad de empleados y equipos
- Área de construcción
- Arreglo físico del sitio (espacios, flujo de materiales, equipos de transporte, etc.)
- Residuos que se generarán, dependiendo del proceso y sistema constructivos adoptado
- Sistemática existente para la eliminación de los residuos generados
- Transportadores y lugares de destino de los residuos ya utilizados por la obra

Con base en las informaciones recolectadas el plan para la gestión de residuos debe contemplar:

- Propuesta para adquisición y distribución de dispositivos de recolección, además de la señalización del sitio
- Definición de los flujos de los residuos en los puntos de envasado inicial y en los lugares de almacenamiento definitivos
- Definición de los lugares para el destino de los residuos y registro de los destinatarios
- Elaboración de la rutina para el registro del destino de los residuos
- Comprobación de las posibilidades de reciclado y aprovechamiento de los residuos generados, previa caracterización de los residuos que podrán ser generados por la obra con base en la fase de ejecución en que la obra se encuentra.

III. Implantación

Esta etapa se inicia tan pronto como la empresa adquiere y distribuye todos los dispositivos de recolección y los demás accesorios necesarios para el programa. Inmediatamente después de la colocación de los dispositivos en el sitio, se realizan entrenamientos con todos los empleados para sensibilizarlos sobre la necesidad de la contribución de cada uno para el éxito del programa e instruirlos en cuanto al adecuado manejo de los residuos, buscando, principalmente, su correcta clasificación.

Además del entrenamiento con todo el equipo de trabajo (empleados y terceros), se realiza un entrenamiento específico con los responsables del control de la destinación de los residuos, orientándolos en cuanto a las soluciones adecuadas e implementando los controles operativos: el CTR (Control de transporte de residuos) y la hoja de registro de destino.

2.2.5 Estrategias de seguimiento y control del plan de gestión

I. Monitoreo y control según proyecto (COMPETIR et al., 2006)

En esta fase del programa se realizan visitas pre-programadas donde se evalúa el desempeño de la obra en relación a la limpieza, separación y destino comprometido de los residuos a través de check-list, de estas listas de verificación se generan informes periódicos remitidos a las empresas, sirviendo como referencia para la dirección de la obra en la corrección de las desviaciones observadas.

Todos los agentes involucrados en el Programa de Gestión de Residuos deben ser previamente identificados y cualificados para garantizar la seguridad de los procesos posteriores a la generación. Para facilitar la implantación del programa por las empresas, se debe mantener un registro actualizado de los proveedores de dispositivos y accesorios, así como de los transportadores y destinatarios.

Para todos los puntos antes mencionados la guía cuenta con formatos detallados para la documentación de los avances del proyecto en materia de gestión.

II. Acciones de fiscalización y control según Karpinsk et al., (2009)

Después de realizado el proceso de gestión de los residuos de construcción y demolición, se debe implantar un programa de fiscalización. Este debe garantizar el funcionamiento de las

acciones propuestas, siendo un importante instrumento de gestión y movilización social. Se deben fiscalizar, sobre todo, los ítems descritos a continuación:

- Descripción de los procedimientos a ser adoptados durante la obra para cuantificación diaria de los residuos sólidos generados por clase / tipo de residuo
- Adecuación de los agentes colectores a las normas del nuevo sistema de gestión
- Acción de los generadores en cuanto al correcto uso de los equipos de recolección, de forma que no pasen a los colectores responsabilidades que no les competen
- Existencia y cumplimiento de los Proyectos de Gestión de Residuos,
- Registro y control, de manera que sea posible la evaluación periódica de su eficacia y perfeccionamiento.

Se debe fiscalizar el correcto descarte y destino de los residuos. La implantación gradual y monitoreada de los puntos de recolección facilita un mejor análisis de las posibilidades de optimización de la distribución de las unidades de recepción de RCD.

2.2.6 Aprovechamiento del RCD en obra

La industria de la construcción se encuentra en un punto de transformación, y el reciclaje de residuos de construcción pretende incorporarse en el día a día de nuestros proyectos. Existe una amplia gama de posibilidades para la reincorporación de residuos de construcción y demolición en obra, la cantidad y tipo de residuo generado son los factores determinantes en el aprovechamiento, considerando además el tratamiento (valorización) que se le puede dar en sitio. En esta investigación se pretende realizar un proyecto de aprovechamiento en obra, dentro del marco del estudio de caso; pero como se ha mencionado los factores que determinan los usos potenciales serán examinados durante la ejecución del mismo. Sin embargo, en la Tabla 8 se muestra un resumen de investigaciones relevantes y otras ejecutadas en el medio donde se ha explorado las diferentes aplicaciones de los residuos de construcción y demolición.

Tabla 8. Resumen de Investigaciones sobre los principales usos potenciales de los residuos de construcción y demolición

INVESTIGACION	APICACION	AUTOR
Aprovechamiento de los RCD en proyectos de construcción y conservación de pavimentos urbanos.	Pavimento	Jimenez & Garcia (2016)
Diseño de un pavimento articulado con adoquines compuestos por reciclados de concreto como agregado fino y cenizas provenientes del bagazo de la caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento portland.	Prefabricados	C. S. Caicedo (2016)
Comportamiento mecánico de elementos prefabricados de concreto con agregados reciclados dentro de la fuente que los genera.	Prefabricados	Londoño, (2016)
Influencia del tiempo de curado en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como material de la estructura del pavimento.	Pavimento	Muñoz, Arias, Benavides, & Otálvaro (2015)
Influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como material de la estructura del pavimento.	Pavimento	Embus & Quintero (2015)
Influencia de la composición en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como elemento de la estructura del pavimento.	Pavimento	Rengifo & Chavez Landazuri (2015)
Uso de residuos de construcción y demolición reciclados (RCD-R-R) con adición de suelo natural como material de pavimentos.	Pavimentos	Quintero & Lopez (2015)
Estudio del uso agregados reciclados de residuos de Construcción y/o demolición (RCD) provenientes de la ciudad de Cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto, caso de los adoquines.	Prefabricados	Caicedo & Perez (2014)
Evaluación de la factibilidad de obtención de argamasa a partir del aprovechamiento de ladrillo y mortero contenidos en escombros.	Concreto	Acevedo (2013)
Uso de residuos de construcción en hormigón estructural.	Concreto	GEAR, (2011)
Uso de residuos de construcción y demolición en bordillos, bovedillas y bloques para accesos peatonales.	Prefabricados	GEAR, (2011)

3. METODOLOGÍA

El proyecto inicia como investigación descriptiva y termina como descriptiva correlacional, enfocándose en el estudio de caso. En la Figura 9 se muestra la estructura general de la metodología, que abarca el análisis de la generación de los residuos de construcción en un proyecto de vivienda, escogido de una muestra representativa del sector en la ciudad de Cali; para lo que se requiere la identificación de los casos potenciales y los criterios de selección que definan el caso de estudio.

En la primera etapa descriptiva se realiza la recolección de información del proyecto, que incluye el análisis del sitio y la obtención de los datos correspondientes a la generación y caracterización de los residuos de construcción; con esto se pasa al análisis profundo de la información y se determina el foco de análisis en el que se desarrolle la investigación.

En la segunda etapa descriptiva correlacional, en base al análisis previo se determina los índices de generación y las opciones posibles para el desarrollo de un proyecto de aprovechamiento en obra, dando como resultado final el diseño de un plan de gestión integral de acuerdo a las condiciones y posibilidades de la empresa.

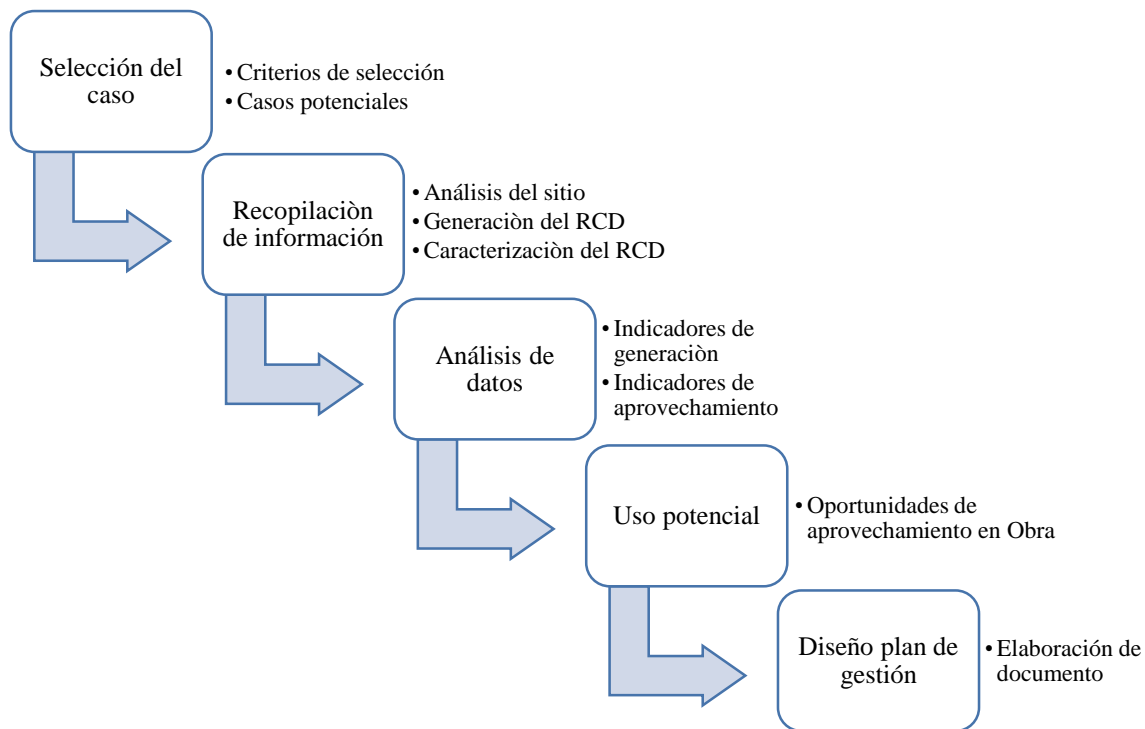


Figura 9. Metodología para el desarrollo de la investigación

3.1 Selección del caso

De los proyectos elegibles, cuya disponibilidad se basa principalmente en la apertura de las empresas constructoras a participar de la investigación, se define uno como caso de estudio en relación a los siguientes puntos.

3.1.1 Criterios de selección

- **Ubicación:** El proyecto se ubicará al sur de la ciudad, en el área de expansión urbana Cali – Jamundí, determinada por la alcaldía de Santiago de Cali en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) – 2014; en esta zona se ubica una gran variedad de proyectos de vivienda actualmente en ejecución, además esta ubicación presenta facilidades logísticas (cercanía proyecto-laboratorio PUJ).
- **Área de construcción:** Se busca que el caso de estudio se ubique según la clasificación de la resolución N°0472-2017 del MADS, como un gran generador, siendo determinante un área de construcción superior a 2.000 m².
- **Metodología constructiva:** De preferencia serán elegibles proyectos de sistema industrializado y mampostería estructural, por el ritmo de avance de obra en comparación como metodologías como la dual.
- **Número de plantas:** Para facilitar las actividades de gestión, el proyecto debe tener disponibilidad de áreas destinadas para este fin, aspecto que se dificulta en edificaciones de gran altura, en consecuencia, se limita el número de plantas a no más de 5.
- **Etapas constructivas actuales:** Se considerará las etapas constructivas (cimentación, estructura, acabados) en las que se encuentren los casos potenciales, por el posible tipo de residuos resultantes en cada etapa disponibles para el análisis. Dando prioridad a la fase de estructura por el posible uso como agregados de los residuos generados de esta etapa.
- **Programación de obra:** Dado que el desarrollo de la investigación está sujeta a un plazo específico, se considera de vital importancia la programación de obra y fechas de entrega.

3.1.2 Casos Potenciales

El punto clave de la elección del proyecto de estudio radica en la predisposición de las empresas a dar acceso a sus obras, siendo este el caso, se identifica un proyecto habitacional

llevado a cabo por una constructora con presencia nacional que desarrolla planes de vivienda a gran escala.

El macro proyecto se ubica al sur de Cali, en el área de expansión, y cuenta con una superficie de 800.000 m² para el desarrollo de 16 conjuntos habitacionales con sus respectivas áreas verdes y vías de acceso. Los proyectos se dividen en dos modalidades, viviendas multifamiliares en torres de 5 pisos en sistema industrializado y viviendas unifamiliares de 2 pisos en mampostería estructural. Al momento del desarrollo de esta investigación se identifican 5 proyectos en ejecución, se realiza una visita a cada uno y se selecciona aquel que cumpla a cabalidad los criterios de selección y cuente con facilidades para el desarrollo de la investigación.

3.2 Recopilación de información

Una vez determinado el caso de estudio, se realiza el análisis del sitio y recolección de información correspondiente a la generación y caracterización del RCD.

3.2.1 Análisis del sitio

Comprende el reconocimiento del área de proyecto, así como la determinación de los puntos de enfoque para la medición de la generación relacionada con la etapa constructiva en que se encuentra, dando prioridad a la estructura. Se reconoce además la organización general de la obra, el manejo y la disposición actual de los residuos de construcción y demolición.

- **Información del proyecto**

Por parte de la constructora se realiza una inducción a los procedimientos de gestión actuales, presentación del personal a cargo de la obra y recorrido de las instalaciones del proyecto. Además, para establecer la relación entre la generación de RCD al avance de obra se solicita el acceso a planos de diseño del proyecto, actas de obra y registros de desalojo de material, datos fundamentales para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

3.2.2 Generación de RCD

El primer paso en la medición de la generación del proyecto es determinar las herramientas y medios para la medición en obra, mismos que se describen a continuación:

- **Clasificación de los RCD**

Se adopta una clasificación específica para la recolección de datos considerando los mejores aspectos de cada una de las normas revisadas en el marco de referencia, que además se

acoplen a la realidad del medio y describan de mejor forma los RCD generados. En la Tabla 9 se muestra la configuración seleccionada, que incluye la clasificación colombiana resolución N°0472-2017 del MADS, de la que se obtiene la distinción general de residuos aprovechables y no aprovechables. En el siguiente nivel se incorpora la clasificación brasileña, resolución N°307 de 2002, que diferencia los residuos reciclables como agregados, reciclables en otros destinos, de recuperación no disponible y residuos peligrosos. Finalmente, y tomando el enfoque del uso potencial de los residuos como agregados, se incorpora la norma española EN 933-11 sobre la composición de los áridos gruesos reciclados, que abarca las combinaciones de residuos más comunes encontrados en obra.

Tabla 9. Clasificación de residuos de construcción para la recolección de datos

Colombiana	Brasileña	Española
Susceptibles de aprovechamiento	Productos de excavación	Tierra Otros
	Residuos reutilizables o reciclables como agregados	Rc: hormigón, mortero, etc. Ru: áridos, piedra natural, etc. Rb: cerámicos Rc + Ru Rc + Rb Otros
	Residuos reciclables a otros destinos	Plásticos Papel / cartón Metales Vidrio Madera Otros
No susceptibles de aprovechamiento	Residuos para los que no se han desarrollado tecnologías o aplicaciones económicamente viables para su reciclaje	Yeso Aislantes Caucho Asbestos Otros
	Desechos peligrosos derivados del proceso de construcción	Contaminados Peligrosos Otros

- **Visitas al proyecto**

Se lleva a cabo la medición de la generación de RCD en el proyecto a través de visitas periódicas a la obra, cuya frecuencia se determina en base a un análisis inicial considerando los siguientes aspectos:

- a) Generación: Que la cantidad de RCD sea la suficiente para permitir la medición.
- b) Manejo y disposición del RCD: Relacionado a las jornadas de limpieza, la disposición en los puntos de acopio y el desalojo final.
- c) Cortes de obra: Para relacionar el avance físico a la generación de RCD.

Tomando en cuenta los aspectos antes mencionados se determina que una visita al proyecto cada dos semanas permite un buen monitoreo de la generación. Este seguimiento se realiza por un periodo de cuatro meses, dentro de los cuales se ejecuta la fase de estructura.

- **Procedimiento de medición**

En cada visita se realiza un recorrido general del proyecto y se reconoce el avance físico de la obra. La medición se inicia con el registro de la ubicación del RCD, para evitar la duplicación de información, considerando lugares clave como: cortadoras de bloque, puntos de acopio oficiales, puntos de acopio temporales junto a las edificaciones, y acumulaciones al interior de cada unidad; para así obtener una mejor correlación con las actividades generadoras. Luego se identifica el tipo de residuo que conforma el RCD apoyada en la clasificación ya determinada anteriormente, se realiza la medición del volumen en base de las medidas promedio de altura, ancho y largo de la base y corona; considerando que se trata de pilas de forma irregular se aplican las ecuaciones pertinentes para el cálculo, usando como formato de registro y guía la plantilla detallada en la Figura 10 y 11.



Fecha (AAAA/MM/DD): _____ Hora (HH:MM) _____

Diligenció: _____

Información General

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

Actividades de obra	Desde (AAAA/MM/DD)		Hasta (AAAA/MM/DD)	
Descripción	Unidad	Cantidad		
Excavaciones y rellenos				
Concretos				
Muros				
Pisos y acabados				
Otros (especificar)				

Otros:

Generación de residuos

Tipos de residuos	Subcategoría				
	R _B	R _C	R _U	R _C +R _U	Otros
Residuos aprovechables como agregados de construcción					
Residuos aprovechables en usos diferentes agregados	Papel	Cartón	Plástico	Metal	Madera
Residuos recuperables con tecnologías sofisticadas	Yeso	Aislantes	Caucho	Asbesto	Otros
Residuos no aprovechables y peligrosos	Contaminados		Peligrosos		Otros

Figura 10. Formato para registro de mediciones Parte 1, Pontificia Universidad Javeriana Cali, (2017)

Guía para la determinación de volúmenes



Variables:

H: altura promedio de la pila

B: ancho promedio de la base de la pila

L: largo promedio de la base de la pila

b: ancho promedio de la corona de la pila

l: largo promedio de la corona de la pila

Cálculos aproximados del volumen:

Área de la base

$$A_B = B \cdot L$$

Área de la corona

$$A_C = b \cdot l$$

Volumen de la pila

$$V = \frac{1}{3} H (A_B + A_C + \sqrt{A_B \cdot A_C})$$

Subcategoría	H (m)	B (m)	L (m)	b (m)	l (m)	A_B (m ²)	A_C (m ²)	V (m ³)
Rb								
Rc								
Ru								
Ru+Rc								
Otros								

Descripción de las subcategorías para residuos aprovechables como agregados de construcción:

Rc: Concreto, productos de concreto, morteros y bloques de concreto

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

R_B: Ladrillos de cerámica, tejas, fachaletas, cerámicos, otros productos de construcción que no flotan

R_A: material bituminoso (reciclado de concreto asfáltico)

R_G: vidrio

Figura 11. Formato para registro de mediciones Parte 2, Pontificia Universidad Javeriana Cali, (2017)

Diseñada para los fines de este tipo de investigación, su estructura permite anotar aspectos clave del proyecto como información general, actividades de obra ejecutadas, generación de residuos diferenciando sus componentes y la determinación de los volúmenes, con el registro de las medidas y usando las formulas especificadas. A esto se suma el anexo fotográfico correspondiente a cada medición.

3.2.3 Caracterización del RCD

La caracterización del RCD, se realiza mediante la toma muestras del residuo generado en obra, proveniente de los puntos de acopio temporales y acumulaciones al interior de las unidades, para tener una mejor perspectiva del potencial de aprovechamiento del RCD relacionado a la separación en el origen, así como de los puntos de cortadora en donde el residuo es menos susceptible a contaminación y su generación es abundante.

Las muestras se toman en diferentes fechas durante la recolección de información y se trasladan al laboratorio de mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, donde se procesan para obtener sus propiedades físicas. Se toma 4 muestras de los acopios temporales y dentro de las unidades, y 5 muestras de los puntos de cortadora; que son trasladadas en envases plásticos, protegidas de la humedad y almacenadas de forma que sus propiedades no sean alteradas.

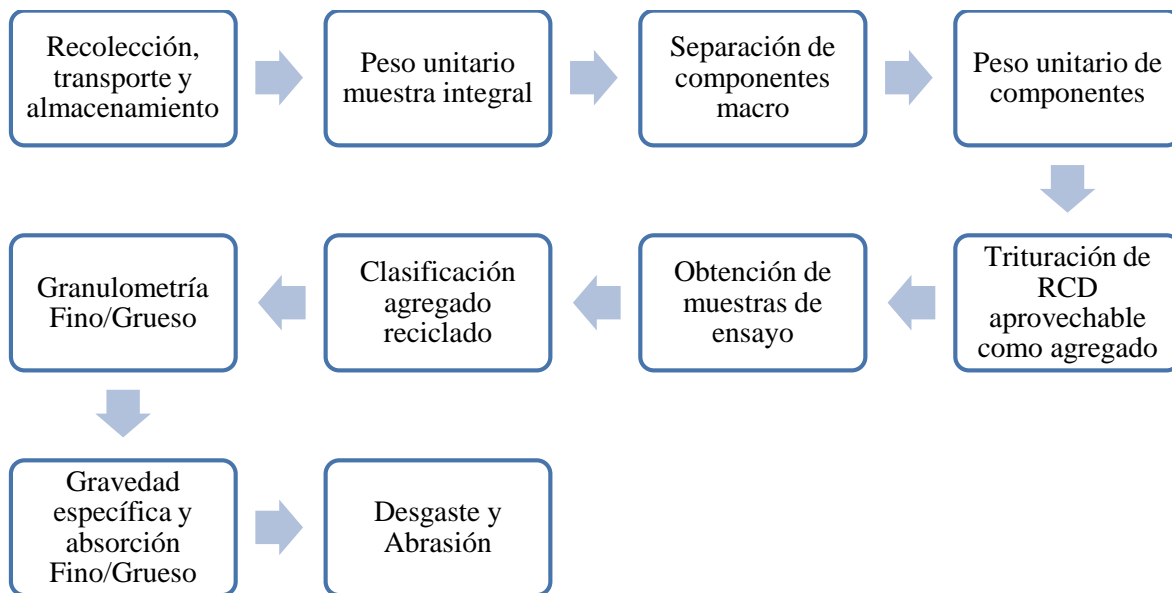


Figura 12. Proceso de caracterización de muestras en el laboratorio

El proceso de caracterización inicia con el registro del peso total de la muestra, clasificada inicialmente como residuo contaminado, luego se realiza la separación de sus componentes macro

y se registra el peso individual de cada uno, el RCD aprovechable como agregado pasa a trituración mientras que el RCD aprovechable en otros usos se descarta. El residuo triturado es cuarteado y de allí se obtienen las muestras necesarias para realizar los ensayos de clasificación de agregado reciclado, granulometría, gravedad específica y absorción, y por último desgaste y abrasión. En la Figura 12 se resume el proceso, los ensayos de caracterización del agregado reciclado de construcción (ARC), que se aplica a cada muestra se ejecutan en cumplimiento de la normativa vigente detallados en la Tabla 10.

Tabla 10. Normas técnicas usadas en ensayos de laboratorio

Ensayos	Norma Técnica Colombiana	Instituto Nacional de Vías Especificaciones	Norma Europea
Reducción del tamaño de las muestras transportadas		INV E -202-13	
Peso unitario.	NTC 92 - 1995	INV E - 217-13	
Clasificación del agregado reciclado (ARC)	-	-	UNE EN 933-11-2010
Granulometría	NTC 77 - 1994	INV E - 213-13	
Gravedad específica y absorción, agregado fino.	NTC 237 – 1995	INV E - 222-13	
Gravedad específica y absorción, agregado grueso.	NTC 176 – 1995	INV E - 223-13	
Resistencia al desgaste de los agregados	NTC 93 - 1995	INV E – 218-13	

- **Densidad Bulk (Peso unitario) INV E - 217 -13**

Permite establecer el peso unitario de un agregado grueso por una unidad de volumen, también, determinar el porcentaje de vacíos ya sean agregados finos y grueso o mezclados. Existen dos formas de realizar esta medición, ya sea en estado suelto o compactado. El estado suelto cuando la acomodación de las partículas no está restringida en un espacio determinado o cuando no existe ninguna influencia externa que permita que estas se acomoden entre sí; y compacto cuando existe acomodación de las partículas por la iteración mecánica de un dispositivo. (INV E 217-13, 2012). Para esta investigación se realiza la obtención del peso unitario aparente en estado suelto del ARC para facilitar una conversión útil de volumen a peso en las mediciones realizadas.

- **Clasificación de agregado reciclado ARC según la UNE EN 933 11- 2010**

Este ensayo permite examinar los agregados reciclados y estimar la participación de sus componentes en proporciones relativas, consiste en la clasificación manual a partir de una porción representativa de áridos gruesos. Los componentes de cada muestra se expresan en porcentaje de masa a excepción de los flotantes que se expresan como un volumen en masa. La cantidad de muestra analizada, como se muestra en la Tabla 11, se desprende del tamaño nominal del agregado.

Tabla 11. Masa de la porción de ensayo de clasificación de agregado reciclado ARC.

Tamaños superior del árido D=mm	Masa de la Porción del ensayo mínima kg
63	50
32 y menor	20

Fuente: UNE EN 933 11 (2010)

Se emplea el tamiz N° 4 para separar el agregado grueso reciclado, la cantidad de residuo que pasa este tamiz se desecha, se prepara la muestra sumergiéndola y agitándola un para lavar las partículas y separar los flotantes, que se recolectan con cuidado y colocan en una probeta con un volumen conocido de agua, se introducen las partículas flotantes sumergiéndolas completamente con la ayuda de un émbolo y se registra el incremento del volumen; luego se secan al ambiente y se registra su peso.

Según la UNE EN 932-2 (2009), se puede clasificar el agregado reciclado, mediante la reducción de masa de la muestra en el laboratorio hasta al menos 1000 partículas, en con esto la masa mínima para la elaboración del ensayo está en función del tamaño nominal de la muestra como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. Directrices sobre la masa de al menos 1000 partículas clasificación del ARC.

Tamaño superior del árido D (mm)	Masa Mínima (kg)
63	50
32	10
20	4
16	2
14	1
8	0,5

Fuente: UNE EN 932-2 (2009).

Determinada la masa del ensayo en 10 kg, se realiza la separación manual de los componentes, se registra el peso y se elabora los cálculos respectivos del ensayo.

- **Granulometría INV E – 213 - 13**

Los ensayos granulométricos se realizan en las fracciones finas y gruesas del ARC, en cumplimiento de la norma INV E – 213-13, para determinar la distribución de los tamaños de las partículas del agregado reciclado mediante la separación en tamices de aperturas progresivamente decrecientes. De este ensayo se obtiene el módulo de finura del ARC y el tamaño nominal; considerando que los RCD de cerámicos y concretos pueden encontrarse en partículas de gran tamaño que al ser trituradas derivan en tamaños específicos, la curva granulométrica obtenida sirve como base para el análisis del uso potencial como agregado.

La muestra requerida para el ensayo es obtenida conforme lo especifica (INV E 213-13, 2012), lavada para eliminar el material fino menor al tamiz N° 200 y secada al horno. La masa para el ensayo es de 5,0 kg para agregado grueso y de 300 gr para agregado fino, las mallas de tamices empleadas para la elaboración de este ensayo se detallan la Tabla 13.

Tabla 13. Distribución de tamices para ensayo de granulometría

Tamaños de la abertura del tamiz (mm)	Tamaños de la abertura del tamiz (Pulg.)
76,1	3
50,8	2
38,1	1 ½
25,4	1
19	¾
12,7	½
9,51	3/8
4,75	N°4
2	N°10
0,425	N°40
0,15	N°100
0,075	N°200
< N°200	<N°200

Fuente: (INV E 213-13, 2012).

- **Gravedad específica y absorción del agregado fino INV E – 222 -13**

El ensayo permite conocer propiedades físicas importantes del ARC, como son la gravedad específica bulk, basada en la masa saturada y la superficialmente seca; y la absorción de los agregados finos, para lo cual empleó la norma (INV E 222-13, 2012).

La muestra requerida para el ensayo es de 2 kg, que sumergen en agua por un periodo de 15 horas y se deja secar en condiciones naturales. Se efectúa la prueba del cono de arena, para

determinar si existe aún humedad en la superficie de las partículas, llenando de material el cono y apisonando ligeramente con 25 golpes, que deben ejecutarse dejando caer libremente el pisón; se levanta con cuidado y verticalmente el molde, cuando los agregados finos se derrumban parcialmente la muestra ha alcanzado la condición superficialmente seca.

Con el material en su punto se divide la muestra en 3 porciones de 500 g que se introducen en picnómetros con ayuda de un cono, los picnómetros deben estar parcialmente llenos con agua destilada para humedecer las paredes e introducir el material, evitando el ingreso de aire y la formación de espacios vacíos. Se adiciona agua hasta llegar al nivel marcado en el picnómetro, de aquí en adelante se usan varios mecanismos para eliminar el aire atrapado en la muestra como: agitar manualmente de manera pausada los picnómetros, introducirlos en un baño de agua caliente y conectarlos a un sistema de vacío hasta comprobar que se no existe aire atrapado. Este procedimiento se realiza en las tres muestras al tiempo, luego se determina la masa del picnómetro con agua hasta la altura del menisco o el enrase de calibración y se registra la temperatura del agua. Se remueve con cuidado el material y se seca en el horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, con el material seco se registra el peso.

- **Gravedad específica y absorción agregado grueso INV E – 223 - 13**

Como lo indica (INV E 223-13, 2012), se obtiene una muestra de ensayo de 3 kg de donde es separada la porción retenida entre los tamices $1 \frac{1}{2}$ y $N^\circ 4$, esta porción se lava por el tamiz $N^\circ 4$ para remover las partículas finas adheridas, clasificándolo como agregado grueso. La muestra analizada se satura previamente por 15 horas para la elaboración del ensayo.

Primero se determina la masa en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS), para esto las partículas se secan usando paños absorbentes que eliminen el agua superficial visible; luego se introduce la muestra en canastillas metálicas y con cuidado se suspende la canastilla completamente sumergida para registrar su peso. Por último, se lleva la muestra al horno a $110 \pm$ $^\circ\text{C}$ y se obtiene la masa de la muestra seca.

- **Resistencia al desgaste de los agregados INVE – 218 13**

Permite conocer las propiedades de durabilidad del ARC, como la resistencia al desgaste, mediante el uso de la Máquina de los Ángeles; según la (INV E 218-13, 2012), la muestra a ensayar no excederá 5000 gr y debe ser lavada y secada en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$; las partículas son sometidas

a una carga abrasiva mediante el uso de esferas de acero, con una masa entre 390 y 445 g por cada una, el tipo de carga depende de la granulometría de la muestra (ver Tabla 14).

Tabla 14. Granulometrías de la muestra para ensayo de abrasión y desgaste

Pasante tamiz Pulg.	Retenido en tamiz Pulg.	Masa de la muestra para ensayo (g) Granulometrías			
		A	B	C	D
1 ½ "	1"	1250 ±25			
1"	¾"	1250 ±25			
¾"	½"	1250 ±25	2500 ±10		
½"	3/8"	1250 ±25	2500 ±10		
3/8"	¼"			2500 ±10	
¼"	Nº 4			2500 ±10	
Nº 4	Nº 8				5000 ±10
TOTAL		5000 ±10	5000 ±10	5000 ±10	5000 ±10

Fuente:(INV E 218-13, 2012).

Para el procedimiento de ensayo se comprueba que el tambor de la maquina este limpio, se introducen las esferas, se coloca la muestra y se cierra el tambor, comprobando que el sello hermético este en su lugar. La máquina se enciende y gira hasta completar 500 revoluciones; la muestra es extraída y se pasa por el tamiz Nº 12 para obtener la porción retenida, mientras que el pasante se desecha. Las partículas resultantes se lavan e introducen en el horno a 110 ± 5 °C, se registra su peso y se realizan los cálculos respectivos. El ensayo se planifica ejecutar al final de la etapa de laboratorio considerando que es un ensayo destructivo y la muestra es limitada.

Este conjunto de ensayos estructura el proceso de caracterización de las muestras y permiten el análisis de los componentes y las propiedades físicas y de durabilidad del ARC como punto de partida para el aprovechamiento y gestión.

3.3 Análisis de datos

Ya que la gestión requiere de inversión y disposición de recursos, es indispensable determinar aquellos residuos que representan un volumen considerable para gestionar; en base a esto se realiza el análisis profundo de la información y se establece el foco de análisis.

3.3.1 Cantidades de obra ejecutada

El seguimiento del avance físico de la obra es clave en la obtención de indicadores de generación y aprovechamiento, de este proyecto se obtiene y procesa la siguiente información:

- **Planos de diseño:** Planos arquitectónicos y estructurales que se reciben en formato digital y en base a los cuales se realiza el cálculo de cantidades de obra por unidad de construcción, en unidades de superficie, masa y volumen, expresados en m^2 , ton y m^3 . También se obtiene el peso total de la estructura para la determinación del porcentaje de cumplimiento en relación a las resoluciones vigentes de aprovechamiento.
- **Actas de Obra:** Se obtiene el acceso a los registros físicos de las actas de estructura del proyecto, puesto que la empresa maneja su propio software para la elaboración de estas y el acceso digital no está disponible. Los cortes de proyecto se realizan de manera quincenal y la unidad de pago en casi la totalidad de los rubros en por casa, así para obtener las cantidades requeridas para la elaboración de indicadores, se cruza el cálculo de las cantidades de obra y el número de viviendas ejecutadas. Además, se identifica del total de las actas aquellos focos en los que se pudo dar seguimiento a la estructura completa, esto requirió de la elaboración de croquis para identificar la ubicación de las casas registradas.
- **Registros de desalojo de material:** De igual forma se accede a los registros físicos de desalojo de material, que comprende las actas de pago quincenales a transportistas. Esta información se usa para comprobar los volúmenes registrados en obra y determinar del total desalojado el porcentaje de RCD potencialmente aprovechable.

3.3.2 Indicadores de Generación

Los indicadores se determinan a través relaciones empíricas, las mismas que resultan del análisis de datos antes descrito. Los indicadores se desprenden de la relación directa entre el volumen producido y el área construida durante el proceso de muestreo, y son la representación en un número de la generación del RCD, útil como un parámetro de control, seguimiento y proyección para futuros proyectos, así la constructora puede mejorar la gestión sobre los RCD que genera.

- **Indicadores de Generación de RCD macro**

Son los indicadores objetivos en esta investigación, representan el comportamiento en generación de residuos de una forma cuantitativa y directa en base a un análisis estadístico de las variables intervenidas, volumen generado en m^3 o ton, área edificada en m^2 y peso total del proyecto en ton. El análisis de estos indicadores permite el cumplimiento de la normativa existente

tanto en la Resolución 0472 del MADS y el Decreto 0771 de la Alcaldía de Santiago de Cali, al darles seguimiento permiten plantear estrategias para su cumplimiento. Así tenemos:

- a) Indicador de Generación Volumen del RCD vs Área Edificada, expresado en m^3/m^2
- b) Indicador de Generación Masa del RCD vs Área Edificada, expresado en kg/m^2
- c) Indicador de Generación Masa del RCD vs Masa Edificada, expresado en ton/ton

Este conjunto de indicadores refleja además el escenario de generación relacionado a la metodología constructiva y pueden ser utilizados para la búsqueda de alternativas en la ejecución de proyectos con un menor impacto ambiental.

- **Indicadores de Generación de RCD por Etapa constructiva**

Estos indicadores resultan de la relación directa de las actividades que conforman la etapa constructiva, en este caso estructura, y la generación de RCD obtenida de las mediciones detalladas, en actividades como hormigones y mampostería.

- a) Indicador de Generación en hormigones, Volumen del RCD vs Volumen de concreto, expresado en m^3/m^3
- b) Indicador de Generación en mampostería, Volumen del RCD vs Área de mampostería, expresado en m^3/m^2

Los mismos permiten la toma de decisiones a nivel de la ejecución de actividades, promoviendo la separación en el origen en aquellas actividades que representan el foco de generación y contaminación del RC.

3.3.3 Indicadores de Aprovechamiento

La determinación del indicador de aprovechamiento, se realiza en función de la composición del residuo, para lo cual se consideró la composición de las mediciones realizadas en obra y de las muestras representativas en el laboratorio, con el uso de la norma UNE EN 933 - 11 de 2010, identificando el tipo de residuo, masa, volumen y el porcentaje de participación en la generación. El aprovechamiento de RCD, en esta investigación se determina con el uso potencial como agregado reciclado de concreto.

El porcentaje de participación de R_c+R_b en el agregado reciclado, se determinó del análisis de las muestras mediante ensayos de laboratorio, específicamente el Peso Unitario de los residuos que conformaron la muestra de RCD.

- a) Indicador de Aprovechamiento, Volumen RCD vs Área Edificada, expresado en m^3/m^2
- b) Indicador de Aprovechamiento, Masa de RCD vs Área Edificada, expresado en kg/m^2
- c) Indicador de aprovechamiento, Masa de RCD vs Masa Edificada, expresado en ton/ton

Los indicadores de aprovechamiento, representan en esta investigación la oportunidad de aprovechamiento del RCD con miras al cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 del MADS y del Decreto 0771 de diciembre de 2018 de la Alcaldía de Santiago de Cali, así como una herramienta vital para establecer una gestión eficiente y coherente con la metodología constructiva utilizada y las características específicas de un proyecto.

3.4 Aprovechamiento del RCD en obra

Una vez analizada la generación e identificados los residuos predominantes y sus propiedades físicas mediante los ensayos de caracterización de agregado reciclado, se establece en base a los resultados obtenidos las posibles aplicaciones. El proyecto de aprovechamiento escogido debe adaptarse además a las posibilidades de reincorporación en obra.

3.5 Diseño del plan de gestión

Los índices de generación y aprovechamiento obtenidos del análisis, sirven de base para el diseño de un plan de gestión de residuos de construcción, conjuntamente con las guías detalladas en el marco de referencia; dan como resultado la redacción de un documento que refleje la realidad del proyecto, sea coherente con la inversión económica y aproveche los recursos disponibles en obra.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Caso Seleccionado

Los cinco casos potenciales ubicados en el macro proyecto cumplen con los criterios de selección de ubicación, área y metodología constructiva, por lo que los puntos restantes son aquellos que definen el caso de estudio. Así, una vez realizada la inspección a cada una de las obras, se procede con el análisis del cumplimiento de los criterios de selección restantes, de acuerdo con la información consignada en la Tabla 15.

Tabla 15. Cumplimiento de criterios de selección en casos potenciales

Proyecto	Ubicación	Área superior a 2000 m ²	Metodología constructiva	Número de plantas y disponibilidad de área	Etapas constructivas	Programación de Obra
AQ	Si	Si	Si	No	No	No
AQ II	Si	Si	Si	No	Si	Si
AC	Si	Si	Si	No	Si	No
MI	Si	Si	Si	Si	Si	Si
VE	Si	Si	Si	No	Si	No

- Proyecto AQ: Vivienda multifamiliar de 5 plantas en sistema industrializado, conformado por 5 bloques de 3 torres, al momento de la inspección se encontraba en su fase final, la mayoría de las torres en etapa de acabados, que no es objeto de esta investigación, la conformación de vías de acceso y parqueaderos tampoco permitía la disposición de áreas para el aprovechamiento y su programación de obra al estar próxima a entrega parcial era muy ajustada.
- Proyecto AQ II: Vivienda multifamiliar de 5 plantas en sistema industrializado, conformado por 10 bloques de 3 torres, este proyecto combina todas las etapas constructivas en los diferentes estados de las torres, una buena disposición y clasificación de los residuos, sin embargo, no dispone de áreas para el aprovechamiento, puesto que dentro de la obra se ubica una planta de concreto compacta que sumada al acopio de áridos ocupa todo el espacio disponible.

- Proyecto AC: Vivienda multifamiliar de 5 plantas en sistema industrializado, conformado por 8 bloques de 2 torres y un bloque de 2 plantas, las etapas en las que se encuentra al momento de inspección son estructura y acabados, es visible una deficiente gestión y disposición de residuos, ya que los acopios designados no son usados, además el cronograma de obra ajustado, los numerosos frentes de trabajo, la conformación de vías y áreas verdes no facilitan el aprovechamiento en obra.
- Proyecto VE: Vivienda multifamiliar de 5 plantas en sistema industrializado, conformado por 10 bloques de 2 torres, al momento de la visita se encuentran en etapas de estructura y acabados, el cronograma de obra lleva retraso a su entrega y no se ajusta al desarrollo de esta investigación, además de no contar con espacio disponible para el aprovechamiento.
- Proyecto MI: Vivienda unifamiliar de 2 pisos en mampostería estructural, conformado por tres manzanas de 44 unidades cada una, estas casas se entregan en obra gris en su mayoría. Al momento de la visita se encuentra en fase de estructura, se dispone de áreas para el aprovechamiento y la programación de obra se ajusta al cronograma de investigación.

De los casos potenciales analizados aquel que cumple a cabalidad los criterios de selección es el Proyecto MI en donde se percibe también una buena disposición por parte de la dirección y personal de obra en la apertura a información e implementación de iniciativas para la gestión, por tanto, este es el proyecto seleccionado como caso de estudio.

4.2 Análisis del sitio

El Proyecto MI consiste en la construcción de 132 viviendas en mampostería estructural, distribuidas en tres manzanas conformadas por 2 hiladas de 22 unidades; en cada hilada se encuentra 3 pachas de 6 casas y una de 4 casas. Cada vivienda es de dos niveles y cubre un área construida de 93,80 m² y área privada de 81,53 m², cuenta con antejardín y patio posterior cerrado en muro de mampostería, la planta baja se conforma de sala-comedor, cocina, baño social y zona de oficio; en la segunda planta se encuentra un baño y tres dormitorios, uno de ellos principal con baño privado y vestier, en la Figura 13 se presenta la distribución arquitectónica tipo de una casa.

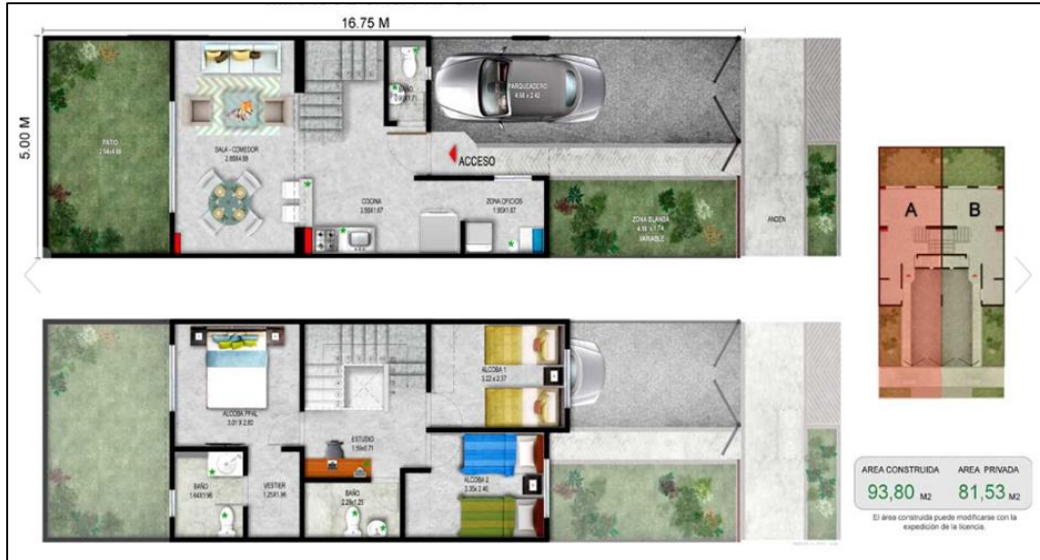


Figura 13. Configuración arquitectónica de la vivienda tipo en el proyecto MI.

El área de campamento de obra comprende una garita, por donde se controla el acceso peatonal a la obra; oficina del profesional S.I.S.O., oficina de bodega y bodega que incluye dos contenedores, casino, campamento de contratistas, contenedor de oficina para dirección y técnicos del proyecto, almacén de combustible y equipos, punto de acopio final de RCD en la obra, junto al acceso para vehículos; almacén de muestras para ensayos, zona de cortadoras y acopio del RCD producido, como se muestra en el esquema de la Figura 14.

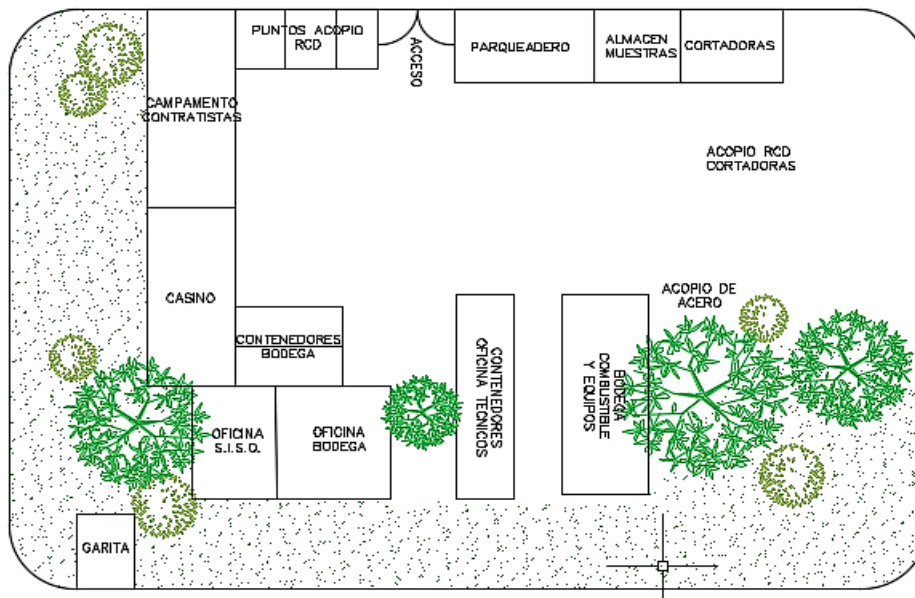


Figura 14. Distribución en planta del campamento de obra.

Del análisis inicial se establece el estado de la obra en sus fases constructivas, teniendo así: manzana 1 en etapa de colocación de cubiertas, manzana 2 en mampostería de patio posterior y manzana 3 en estructura principal, con un avance registrado a la fecha de inicio del proyecto de 32 viviendas en mampostería de 1ra planta; de aquí se determina que la medición de la generación se enfocara en la manzana 3 para la obtención de indicadores detallados. En la Figura 15 se presenta la distribución en planta del proyecto.



Figura 15. Distribución en planta del proyecto

Se identifica también los puntos importantes para la cuantificación y gestión del RCD, determinados en relación al entendimiento de la dinámica de trabajo en la obra, en su estado actual algunos acopios se encuentran parcial o totalmente destruidos por la descarga y carga de los residuos, el ejemplo principal se muestra en la Figura 16 correspondiente al acopio oficial de residuos en la obra.



Figura 16. Acopios finales de RCD en el campamento.

El siguiente punto clave para la cuantificación de RCD es la zona de corte de ladrillo con su respectivo acopio de residuo generado, en la Figura 17 se muestra la primera estación de corte, pero al finalizar la obra se agregaría otra para mejorar el rendimiento.



Figura 17. Zona de corte de ladrillo y acopio de residuos generados.

Los acopios temporales son acumulaciones de RCD producto del nivel de organización de los contratistas, quienes depositan los residuos en las zonas de antejardín y laterales, para que luego sean desalojados definitivamente o trasladados al acopio oficial de la obra; estas acumulaciones interactúan constantemente con el suministro de materiales, en la Figura 18 se muestra ejemplos de estos puntos no oficiales de acopio.



Figura 18. Puntos de acopio temporal de residuos.

Por ultimo tenemos los acopios de residuos al interior de las viviendas, que se ubican en el espacio disponible junto y bajo las escaleras como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Acopio de residuos al interior de las unidades de vivienda.

Los acopios antes mencionados son los puntos de medición claves para la cuantificación de la generación de residuos en el proyecto y reflejan el nivel de control e implementación de prácticas de gestión de RCD.

4.3 Generación de RCD en el proyecto caso de estudio

De acuerdo con lo descrito en la metodología, la cuantificación de la generación de RCD se realiza mediante un seguimiento discreto en obra a partir de visitas y mediciones directas. La visita de reconocimiento inicial se lleva a cabo el 16/05, a partir de esta se realizan visitas semanales que permiten familiarizarse con la dinámica de la obra y establecer el lapso de 15 días como el óptimo para la medición.

En cada visita se realiza un recorrido general del proyecto y se reconoce el avance físico de la obra. La medición se inicia con el registro de la ubicación del RCD, considerando los puntos clave identificados en el análisis del sitio como: zona de cortadoras, puntos de acopio oficiales, puntos de acopio temporales y acumulaciones al interior de cada unidad, se identifica el tipo de residuo que conforma el RCD apoyado en la clasificación mostrada en la Tabla 9, se registra las medidas necesarias para el cálculo de volúmenes, siguiendo la guía descrita en el formato de la Figura 11, y por último se toma una fotografía para archivo. En la Tabla 16 se muestra un ejemplo de la información registrada en una medición en la zona de cortadoras (ver Figura 20).

Tabla 16. Resumen de información registrada en una medición.

Ubicación en proyecto	Tipo de residuos	Subcategoría	H (m)	B (m)	L (m)	b (m)	I (m)	A_B (m ²)	A_C (m ²)	V (m ³)
Zona de cortadoras	Residuos aprovechables como agregados	Rb	2,10	5,20	5,80	2,10	2,40	30,16	5,04	33,27



Figura 20. RCD generado en zona de cortadoras

El seguimiento de la generación de RCD se llevó a cabo durante la etapa de estructura que corresponde alrededor de cuatro meses, en las 8 visitas realizadas se registró un total de 251 mediciones en los sitios de análisis, con un volumen final de 494,5 m³ generados en el periodo, en la Tabla 17 se resumen los resultados recolectados. De acuerdo con la información recopilada (ver Figura 21), un 2% de los RCD generados son aprovechables en otros usos; del orden del 41% son aprovechables como agregados, la mayoría de estos por la producción obtenida de las cortadoras que generan un RCD de cerámicos sin contaminantes de otros materiales y casi directamente aprovechables, 173,3 m³ que representan un 35% del total generado; mientras que el 38% están contaminados, y finalmente el 19% son aprovechables mixtos; es decir, una mezcla de Rc + Rb + Ru + tierra, plásticos, metales o cartón. En principio, a partir de esta condición, la posibilidad de cumplimiento de la meta de la Resolución 0472-2017 del MADS se limitaría al 41% de los residuos generados y dependería en su mayoría de la generación en las cortadoras, haciendo difícil el cumplimiento de la meta bajo estas condiciones si no es considerado el aprovechamiento del material de excavación o importar residuos de otra obra.

Tabla 17. Resumen del control de generación de residuos a partir de las visitas de campo.

Fecha	Residuos de construcción y demolición generados (m ³)				Total visita
	Contaminados	Aprovechables agregados	Aprovechables mixtos	Aprovechables otros usos	
21/5	45,7	12,49	--	4,83	63,0
25/5	--	6,54	--	--	6,5
30/5	13,6	4,10	5,12	0,085	22,9
13/6	8,36	22,66	39,47	0,82	71,3
27/6	65,61	15,62	8,14	--	89,4
18/7	10,30	44,18	14,74	1,37	70,6
1/8	0	35,77	8,12	0,42	44,3
22/8	44,63	60,89	20,94	0,0054	126,5

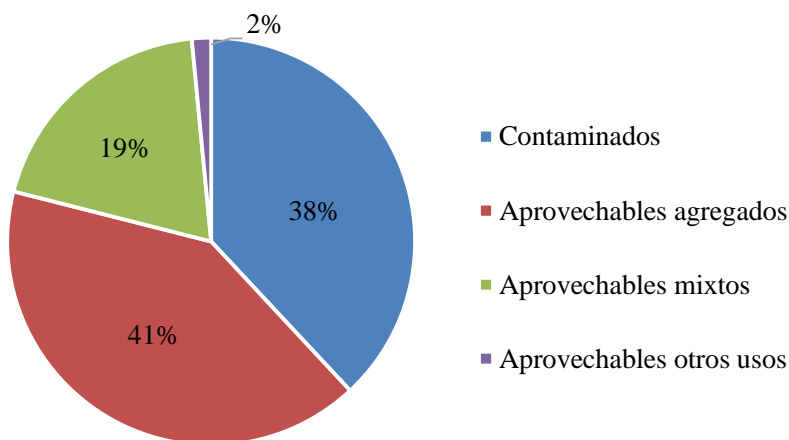


Figura 21. Distribución de los RCD de acuerdo a la clasificación básica para el aprovechamiento.

4.4 Caracterización del RCD

La caracterización del RCD, se realiza mediante la toma muestras del residuo generado en obra, proveniente de los puntos de acopio temporales y acumulaciones al interior de las unidades de vivienda, así como de la zona de cortadoras en donde el residuo es menos susceptible a contaminación y su generación es abundante. Las 9 muestras son tomadas en diferentes fechas a lo largo del proceso de cuantificación del RCD y transportadas al laboratorio de mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, donde se procesan para obtener sus propiedades físicas.

El proceso de caracterización inicia con el registro del peso total de la muestra, clasificada inicialmente como residuo contaminado, luego se realiza la separación de sus componentes macro

y se registra el peso individual de cada uno, el RCD aprovechable como agregado pasa a trituración mientras que el RCD aprovechable en otros usos se descarta. El residuo triturado es cuarteado y de este se obtienen las muestras necesarias para realizar los ensayos, en la Figura 22 se esquematiza el proceso descrito.

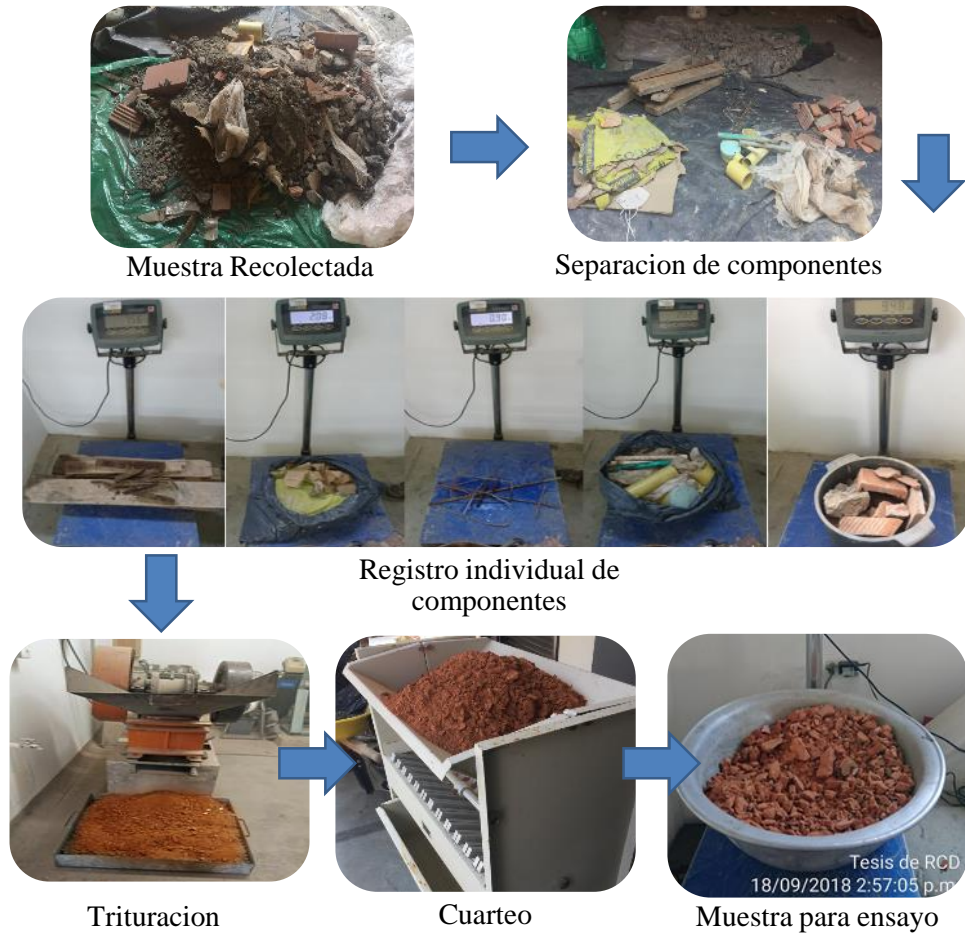


Figura 22. Procesamiento del RCD para la obtención de muestras

4.4.1 Composición de los RCD muestreados en obra

En la Figura 23 se presenta la composición de las muestras analizadas en peso, en general más del 83% de los RCD corresponden a una mezcla entre residuos de concretos y morteros (Rc) y residuos cerámicos (Rb), los cuales son aprovechables como agregados.

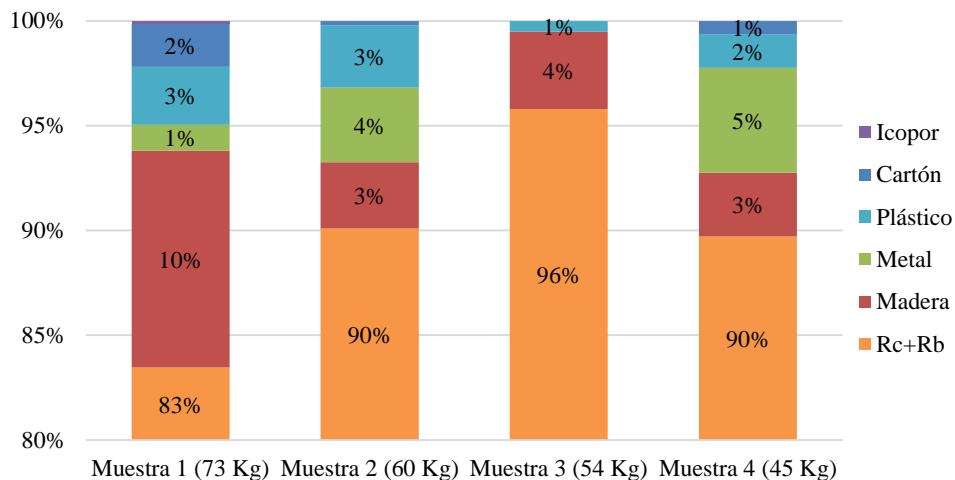


Figura 23. Composición de los RCD muestreados en las unidades de vivienda en peso.

Al estudiar la composición en función del volumen más del 46% corresponden a los residuos Rc + Rb (ver Figura 24), por lo que una identificación inicial en volumen a partir de los viajes que se llevan a disposición final puede generar altos errores de cuantificación, esto si no se separan adecuadamente en obra.

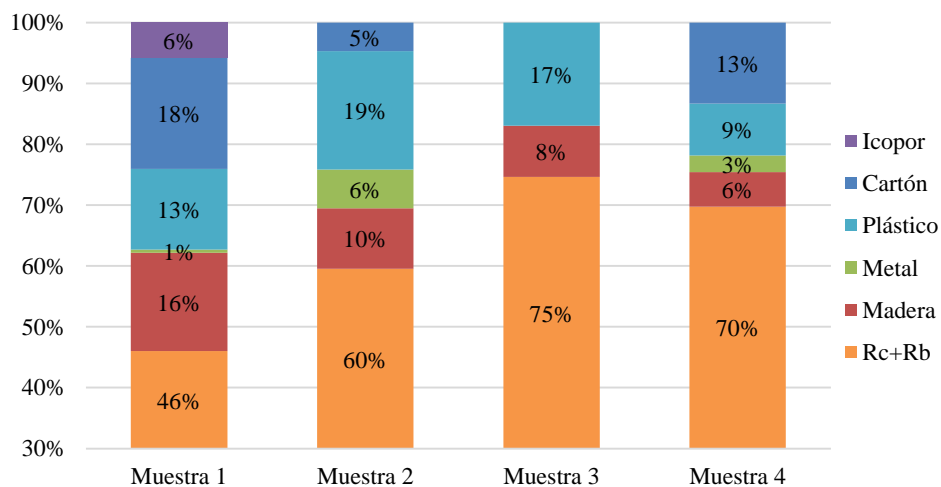


Figura 24. Composición de los RCD muestreados en las unidades de vivienda en volumen.

En cada una de las subcategorías identificadas en las Figura 23 y Figura 24, para facilitar una conversión útil de volumen a peso se ejecutaron ensayos de peso unitario aparente de acuerdo con la norma INVE - 217 -07, en la Tabla 18 se resumen los resultados encontrados.

Tabla 18. Resultados del peso unitario en cada uno de los RCD muestreados en las unidades de vivienda según su composición.

Componentes	Peso unitario (kgf/m ³)			
	M1	M2	M3	M4
Cartón	68,2	33,3	--	32,0
Madera	387,7	244,8	400	362,7
Metal	1440,0	432,7	--	1244,4
Icopor	14,3	--	--	--
Plástico	126,3	118,9	28,0	128,6
Rc+Rb	1098,1	1170,2	1177,0	874,0

Debido a la concentración de residuos cerámicos Rb de la zona de corte de ladrillo, se tomaron 5 muestras para la determinación del peso unitario, en la Figura 25 se presentan los resultados obtenidos, en general el peso unitario osciló entre 835,7 y 981,5 kgf/m³, al comparar estos datos con los reportados en la Tabla 18 es posible inferir que en la muestra M4 predominaban los residuos Rb sobre los Rc.

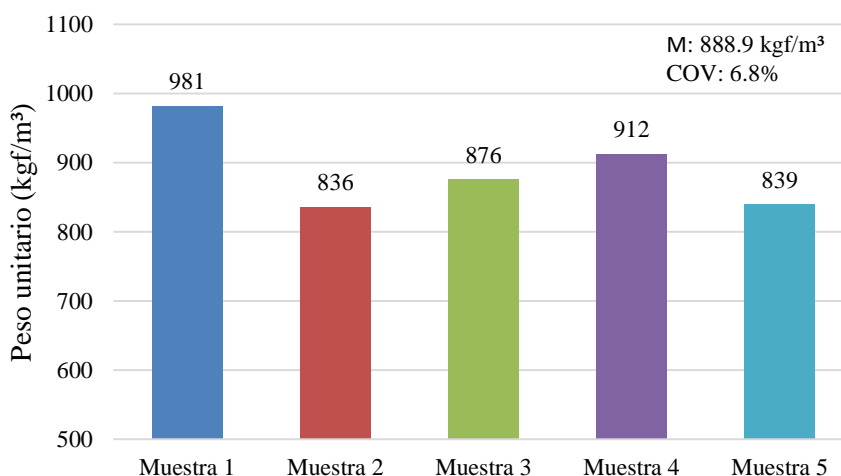


Figura 25. Pesos unitarios de las muestras recolectadas en la zona de corte de ladrillo.

4.4.2 Caracterización de los RCD aprovechables como agregados

De acuerdo con la metodología planteada, después de separar los residuos se procedió a caracterizar aquellos que tienen un alto potencial de aprovechamiento como agregados reciclados de construcción (ARC).

Una vez seleccionado el material se procedió a caracterizar de acuerdo con la norma UNE EN 933 11- 2010, separando sus componentes y material flotante como se aprecia en la Figura 26.



Figura 26. Ensayo de clasificación de agregado reciclado de concreto

De las muestras generales de RCD se identificó que el residuo predominante fueron los Rc (concretos y morteros), con porcentajes superiores al 52,5% en peso, seguidos de los cerámicos con un porcentaje en peso entre el 21,7 al 38,8% (ver Figura 27). En general la cantidad de partículas flotantes, que en algunos casos pueden considerarse como contaminantes dependiendo de la aplicación oscilan entre 2 a 7,2 cm³/kg (ver Figura 28).

Finalmente, en la Figura 29 se presenta la composición del agregado muestreado en la zona de corte de ladrillo, tal como era previsible, el material en casi su totalidad corresponde a cerámicos Rb, esto es un indicador que teniendo concentrada esta zona de trabajo se garantiza que los RCD generados allí no se mezclan ni contaminan con otros residuos de la obra.

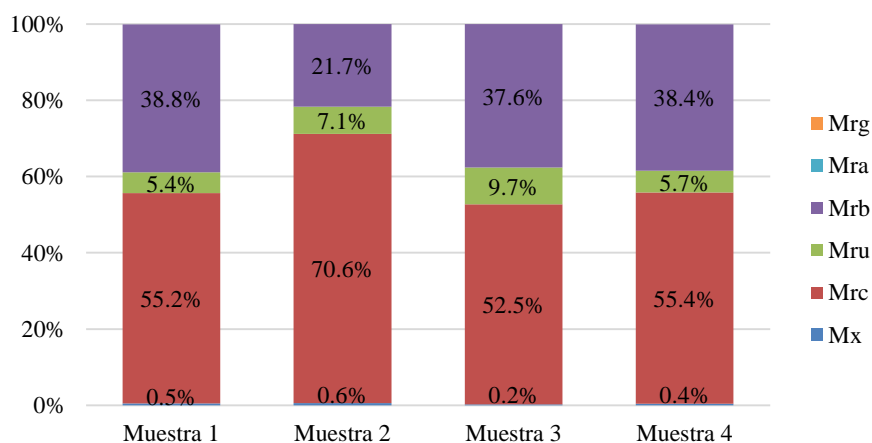


Figura 27. Clasificación del ARC muestreado en las unidades de vivienda según la norma UNE EN 933 11- 2010.

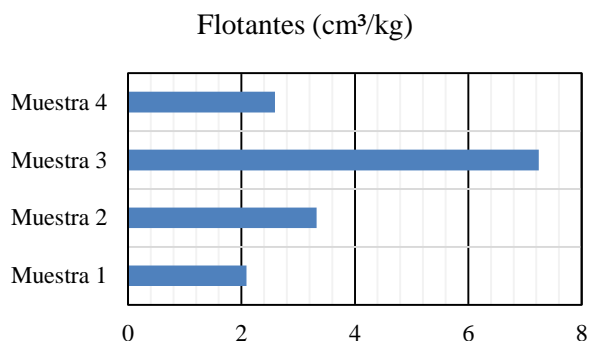


Figura 28. Cantidad de material flotante de las muestras en las unidades de vivienda según la norma UNE EN 933 11- 2010.

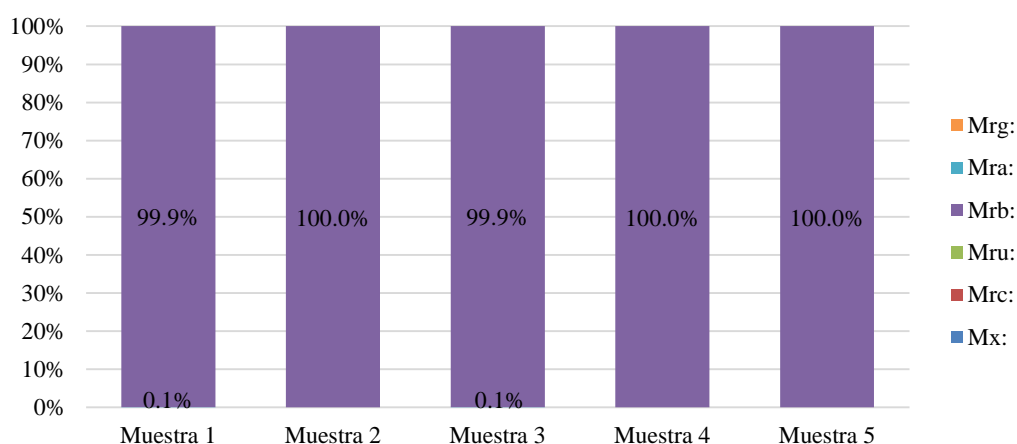


Figura 29. Clasificación del ARC recolectado en la zona de corte de ladrillo según la norma UNE EN 933 11- 2010.

Una vez definida la composición y el potencial uso de los agregados derivados de RCD, se procedió a caracterizar los aspectos mínimos que se emplean en las especificaciones de agregados para construcción, las cuales corresponden a:

- Tamaño y distribución de las partículas (granulometría);
- Gravedad específica y absorción del agregado grueso;
- Gravedad específica y absorción del agregado fino;
- Resistencia al desgaste por abrasión en la máquina de Los Ángeles.

Con relación al tamaño y distribución de las partículas, se realizó el ensayo de granulometría como se muestra en la Figura 30, según la norma de ensayo INV E-213-13.



Figura 30. Ensayo granulométrico de agregados reciclados

Las muestras obtenidas de las viviendas presentan alrededor del 3% de finos (partículas menores a 0,075 mm), contenidos de arena entre 56 y 69%, y de grava entre el 30 y 40%; el módulo de finura (Mf) promedio de la fracción gruesa de 7,07 describe una grava de tamaño apropiado; mientras que la fracción fina con 4,12 corresponde a una arena muy gruesa, lo que limita pero no elimina su uso como agregado; por otra parte el coeficiente de uniformidad (Cu) superior a 20, conjuntamente con el coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3, definen un árido de buena gradación con posible uso como material de relleno; en la

Tabla 19 se condensa los resultados de cada muestra, mientras que en la Figura 31 se presenta la distribución granulométrica.

Tabla 19. Resultados de distribución granulométrica de muestras ARC en vivienda

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Media
Grava	40 %	30 %	40 %	31 %	35 %
Arena	56 %	69 %	57 %	65 %	62 %
Finos	4 %	2 %	3 %	3 %	3 %
Mf Ag. Grueso	7,08	7,11	7,04	7,04	7,07
Mf Ag. Fino	3,93	4,19	4,40	3,97	4,12
Cu	31,69	19,42	22,33	29,50	25,73
Cc	1,79	1,11	3,50	1,48	1,97

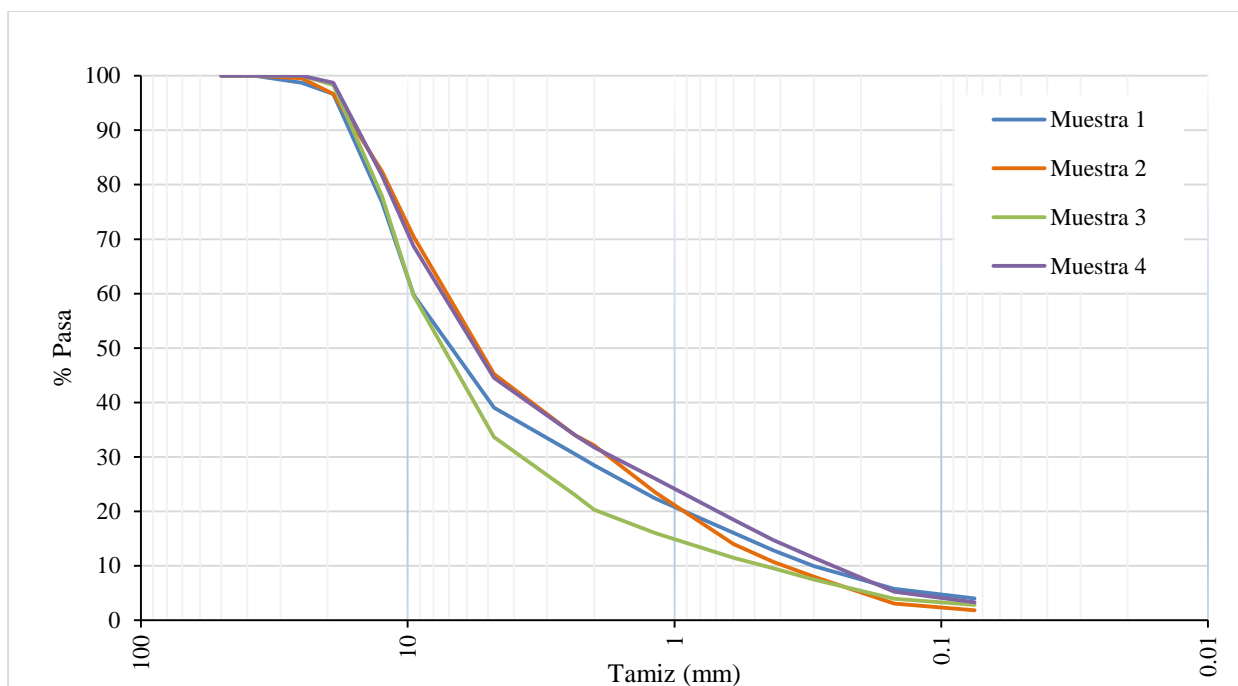


Figura 31. Distribución granulométrica por tamizado del ARC muestreado en las unidades de vivienda.

Para las muestras provenientes de la zona de corte de ladrillo, el contenido de finos osciló entre el 3 al 11%, característica propia de la actividad debido a que el residuo fino se acumula de forma variable en el acopio; la arena representó entre 33 a 47%, con un módulo de finura promedio de 3,83 que la definen como muy gruesa; finalmente la grava entre 47 a 64% siendo el agregado predominante y con módulo de finura promedio de 7,15, se describe como una grava de tamaño adecuado; además de esto los coeficientes de uniformidad promedio de 86,28 y de curvatura superior a 3, definen en general un árido de mala gradación; en la Tabla 20 se recoge los resultados de cada muestra, mientras que en la Figura 32 se presenta la distribución granulométrica.

Tabla 20. Resultados de distribución granulométrica de muestras ARC en zona de corte

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Media
Grava	47 %	56 %	47 %	56 %	64 %	54 %
Arena	42 %	34 %	47 %	38 %	33 %	39 %
Finos	11 %	10 %	6 %	7 %	3 %	7 %
Mf Ag. Grueso	7,07	7,27	7,14	7,06	7,22	7,15
Mf Ag. Fino	3,43	3,43	3,93	4,02	4,33	3,83
Cu	155,11	166,53	55,00	43,13	11,63	86,28
Cc	3,06	29,07	7,27	12,36	3,87	13,13

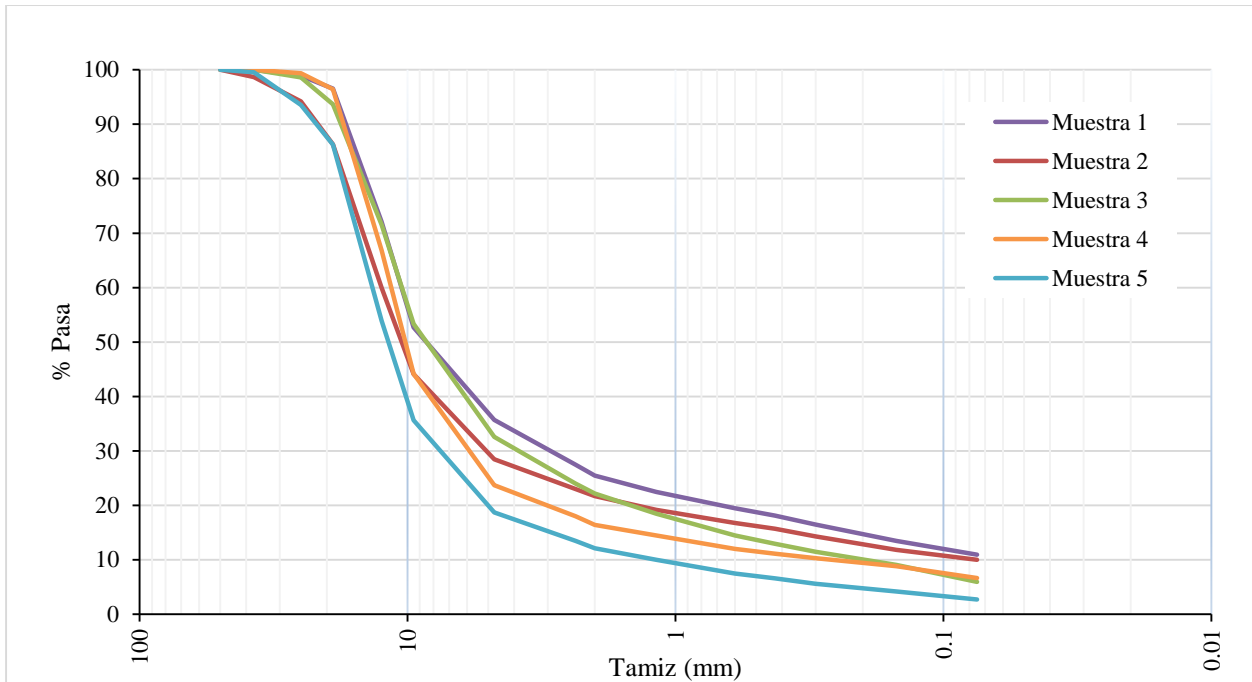


Figura 32. Distribución granulométrica por tamizado del ARC muestreado en la zona de corte de ladrillo.

En general el ARC muestreado presenta un tamaño máximo nominal de 1" (25mm), y módulos de finura similares, tanto en agregados gruesos que derivan en gravas de tamaño óptimo, como en agregados finos que comprenden arenas clasificadas como muy gruesas. Esto se complementa con los coeficientes de uniformidad y de curvatura, que varían significativamente según la procedencia del RCD, entre la zona de corte y del interior de las viviendas, debido a su composición y dimensiones originales; en el caso de la primera, el Rb en su forma original se encuentra en grandes tamaños que al pasar por el proceso de trituración producen una mayor cantidad de gravas y en el extremo opuesto está el considerable aporte de finos que desequilibra la gradación; en cambio los segundos al tener la combinación de Rc+Rb y generarse de RCD de dimensiones menores, compensan la distribución de las partículas y contienen bajo porcentaje de finos.

Con relación a la gravedad específica y absorción del agregado fino, el ensayo se ejecutó según la norma INV E-222-13 (ver Figura 33), realizando 3 ensayos por muestra para obtener las características de absorción, y gravedad específica bulk, basada en la masa saturada y superficialmente seca, cuyos valores se resumen en la Tabla 21, para las muestras del interior de viviendas, y Tabla 22 para las de la zona de corte; en ambos casos se presentan valores por debajo del rango de 2,4 a 2,9 correspondiente a los agregados naturales, sin embargo las muestras

procedentes de la cortadora presentan valores menores a las provenientes de las viviendas, correspondiendo de manera coherente con la composición del ARC.



Figura 33. Ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino.

En cuanto a la absorción, los valores más altos se presentan en las muestras tomadas en la cortadora de ladrillo, con un promedio de 16,6% (ver Figura 35), mientras que los valores más bajos se registran en las muestras tomadas en las viviendas con valores desde el 4,1 al 9,8% (ver Figura 34), este parámetro es principalmente afectado por la cantidad de finos contenida en los ARC de cortadoras en relación a las viviendas, como ya se observó en sus distribuciones granulométricas.

Tabla 21. Resultados gravedad específica ARC fino muestreado en interior viviendas.

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Media
Gravedad específica bulk g/cm^3	2,30	2,35	2,16	2,19	2,25
Gravedad específica sss g/cm^3	2,46	2,47	2,37	2,37	2,42
Gravedad esp. Aparente g/cm^3	2,73	2,68	2,73	2,67	2,70

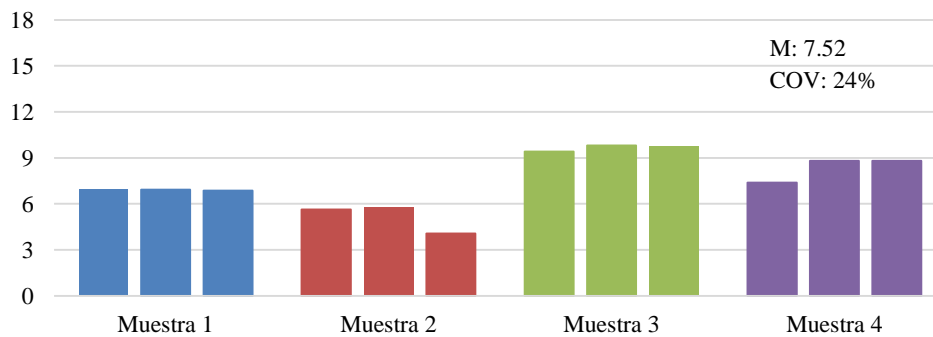


Figura 34. Resultados de absorción del agregado fino en la muestra de ARC tomada en las viviendas.

Tabla 22. Resultados gravedad específica ARC fino muestreado en zona de corte.

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Media
Gravedad específica bulk g/cm ³	2,21	2,20	1,85	1,90	2,18	2,07
Gravedad específica sss g/cm ³	2,56	2,54	2,17	2,21	2,56	2,41
Gravedad esp. Aparente g/cm ³	3,43	3,36	2,74	2,75	3,50	3,16

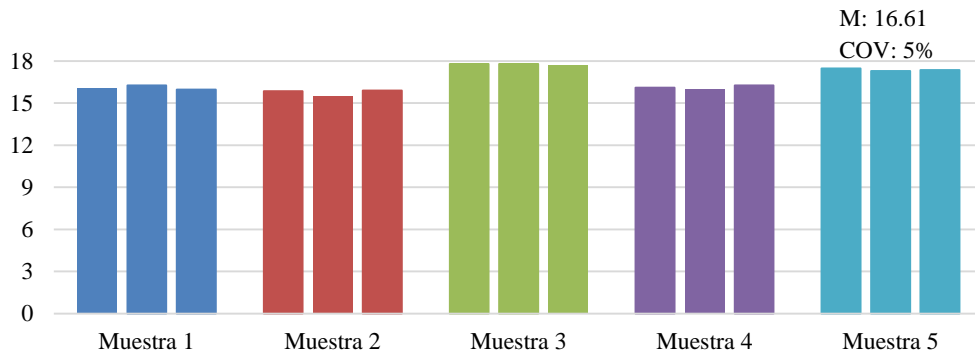


Figura 35. Resultados de absorción del agregado fino en la muestra de ARC tomada en la zona de corte.

Para la absorción de agregado grueso, determinado según la norma INV E-223-13, se observa un comportamiento similar a los agregados finos (ver Figura 36 y Figura 37), cuyas diferencias radican en la composición de las muestras, presentando valores de absorción más altos en la zona de corte.

Tabla 23. Resultados gravedad específica ARC grueso muestreado en interior viviendas.

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Media
Gravedad específica bulk g/cm ³	1,92	1,91	1,97	1,94	1,93
Gravedad específica sss g/cm ³	2,16	2,15	2,23	2,19	2,18
Gravedad esp. Aparente g/cm ³	2,52	2,51	2,66	2,58	2,57

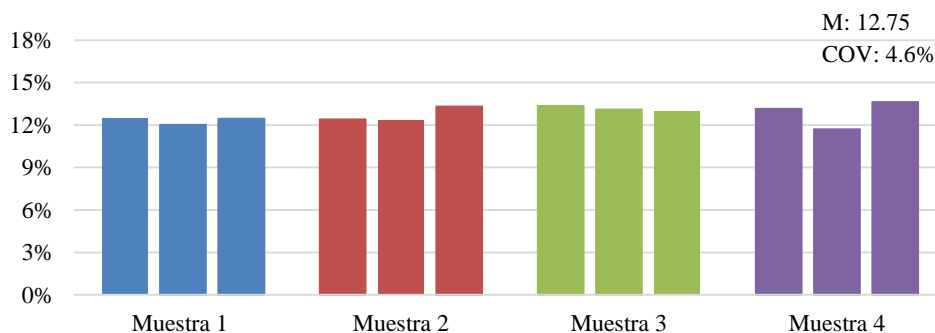


Figura 36. Resultados de absorción del agregado grueso en la muestra de ARC tomada en las viviendas.

Tabla 24. Resultados gravedad específica y absorción ARC grueso muestreado en zona de corte.

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Media
Gravedad específica bulk g/cm ³	1,85	1,85	1,83	1,86	1,85	1,85
Gravedad específica sss g/cm ³	2,17	2,16	2,15	2,18	2,17	2,17
Gravedad esp. Aparente g/cm ³	2,71	2,70	2,71	2,74	2,70	2,71

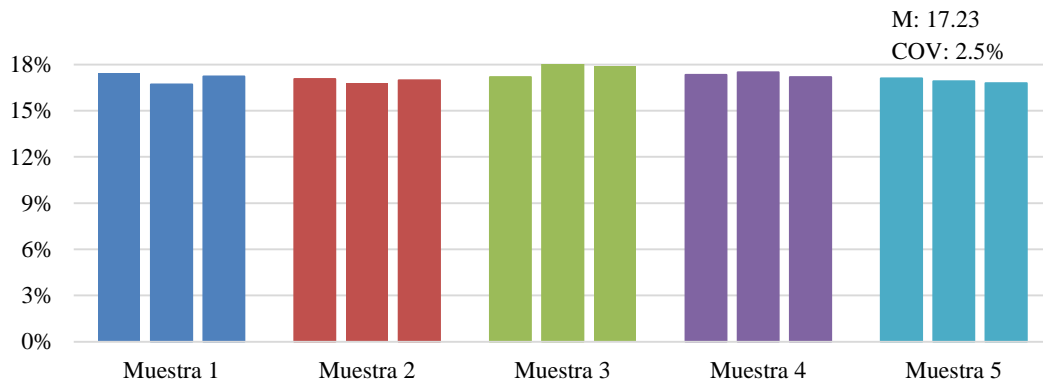
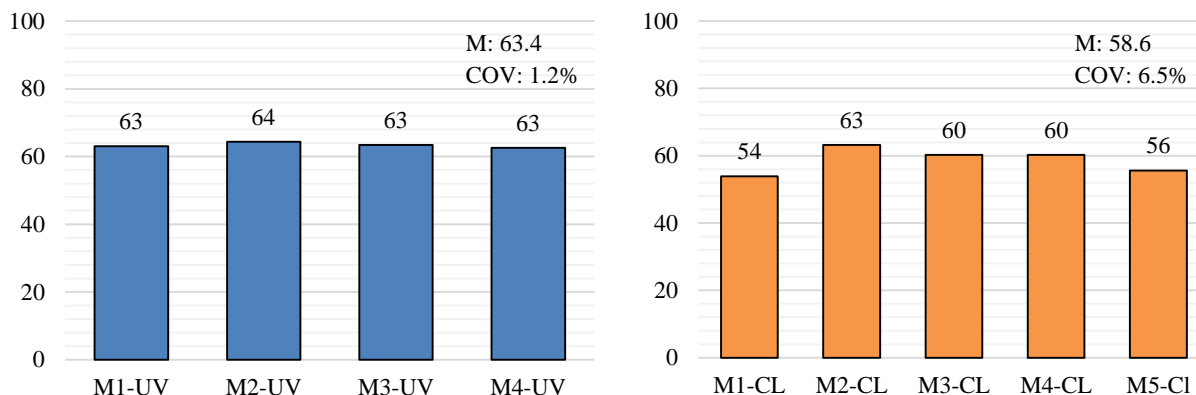


Figura 37. Resultados de absorción del agregado grueso en la muestra de ARC tomada en la cortadora de ladrillo.

La última característica determinada corresponde a la resistencia al desgaste de los agregados, según la norma INV E – 218-13, en la Tabla 25 se relacionan los parámetros empleados en el ensayo y sus resultados se presentan en la Figura 38, en general, el desgaste supera el 54%, y presenta valores del orden de 60 a 63%.

Tabla 25. Parámetros empleados en la determinación de la resistencia al desgaste de los agregados.

DATOS	Muestras de la unidad de vivienda				Muestras de la zona de corte de ladrillo				
	M1-UV	M2-UV	M3-UV	M4-UV	M1-CL	M2-CL	M3-CL	M4-CL	M5-CL
Gradación usada	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Carga de esferas	11	11	11	11	11	11	11	11	11
No. revoluciones	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Pa :	5.000	5.000	5.001	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Pb :	1.846	1.782	1.828	1.871	2.304	1.840	1.987	1.988	2.220
P :	3.154	3.218	3.173	3.129	2.696	3.160	3.013	3.012	2.780



a) Muestras de unidades de vivienda

b) Muestras de la zona de corte de ladrillo

Figura 38. Resultados de los ensayos de desgaste por abrasión en la máquina de Los Ángeles.

4.5 Cantidades de obra ejecutada

El seguimiento del avance físico de la obra es clave en la obtención de indicadores de generación y aprovechamiento, de este proyecto se obtiene y procesa la siguiente información:

- **Calculo cantidades de obra**

Se obtiene de forma manual a partir de los planos arquitectónicos e informes estructurales facilitados por la constructora, el cálculo se enfoca principalmente en los elementos de las actividades que más RCD generan en la etapa constructiva evaluada, en este caso la mampostería y los hormigones; como objetivo final del proceso se deduce el peso del proyecto, utilizando las densidades generales conocidas de los materiales, como por ejemplo para el hormigón armado 2.400 kg/m^3 , mientras para el ladrillo de la mampostería se calculó en función del peso y las dimensiones del usado en obra, obteniendo 1.000 kg/m^3 . El peso del proyecto servirá para evaluar el cumplimiento de la resolución 0472 de 2017 del MADS, en la Tabla 26 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 26. Resumen de cálculo de cantidades de obra y peso para una vivienda

Ubicación	Elemento	Cantidades		Peso unitario (kg/m^3)	Peso (kg)
		(m^2)	(m^3)		
Cimentación	Vigas		3,15	2.400	7.561,1
	Contrapiso		0,28	2.400	675,1
	Losa	39,27	2,75	2.400	6.596,8
Piso 1	Ladrillo mampostería	88,23	8,82	1.000	8.822,6
	Grouting		1,53	2.250	3.437,5
	Mortero de pega		1,13	2.100	2.371,5

Ubicación	Elemento	Cantidades		Peso unitario (kg/m ³)	Peso (kg)
		(m ²)	(m ³)		
Piso 2	Losa entrepiso y escaleras	42,20	5,67	2.400	13.603,2
	Vigas		1,60	2.400	3.835,8
	Ladrillo mampostería	110,47	11,05	1.000	11.046,5
	Grouting		1,48	2.250	3.337,4
	Mortero de pega		1,41	2.100	2.969,3
	Vigas		1,60	2.400	3.835,8
				Total:	68.092,6

Como punto de comparación del resultado obtenido, en la Tabla 27 se muestran los datos del informe de diseño estructural, del que se extraen únicamente las cargas muertas sin considerar los acabados, que es tal como se entregan las viviendas; así se observa que el peso calculado para el proyecto es cercano al usado para su diseño y de esta forma se ratifica su validez, este insumo podría ser útil para definir la meta de la resolución, sin embargo es de resaltar que los resultados mostrados en la Tabla 26 no incluyen la cubierta ni su estructura.

Tabla 27. Resumen de cargas del proyecto según informe estructural (1 casa)

Descripción	Elemento	Carga
Carga Entrepisos	Losas	240 kg/m ²
	Vigas de amarre	63 kg/m ²
	Muros divisorios	228 kg/m ²
		531 kg/m²
Carga Cubierta	Sistema residencial	60 kg/m ²
	Vigas de amarre	63 kg/m ²
	Antepecho	70 kg/m ²
		193 kg/m²
Área de construcción analizada		94,2 m²
Peso de la vivienda		68.200,8 kg

- **Registros de desalojo de material**

Uno de los principales controles llevados a cabo durante la medición de la generación, fue el monitoreo del desalojo de residuos, el desalojo hace referencia al material que era retirado de la obra y se conducía directamente a un sitio de disposición final. El propósito de este control era evitar duplicar la estimación de la cantidad de RCD que transitaba de los depósitos temporales a los acopios oficiales de la obra, en la Tabla 28 se realiza una comparación mensual del volumen generado vs el desalojado; se recoge de las anotaciones de visitas que la diferencia del total transportado se debe principalmente al material proveniente de excavaciones, específicamente de

las vigas de patio posterior que representan alrededor de 160 m³ y cuyo impacto se centra en el mes de Junio.

Tabla 28. Registro de material desalojado vs RCD generado en proyecto

Mes	Nº de Viajes	Desalojo (m ³)	Mediciones RCD (m ³)	Diferencia (m ³)
Mayo	19	172,0	92,5	79,5
Junio	36	320,0	160,7	159,3
Julio	21	188,0	114,9	73,1
Agosto	20	170,0	126,5	43,5
Total	96	850,0	494,5	355,4

- **Actas de Obra**

Se procesa 7 actas del periodo en estudio, de las cuales se extrae los rubros principales correspondientes a las cantidades de obra calculadas, de esta forma se logra dar seguimiento al avance de obra total.

Por el estado inicial del proyecto descrito en el numeral 4.2, el seguimiento al avance de obra se da en el tercio final del proyecto, por lo que el peso total ejecutado incluye las actividades de estructura finales realizadas en las manzanas 1 y 2; mientras que el seguimiento parcial enfocado a la medición específica, contempla casi en su totalidad la ejecución de la manzana 3. Al final de la Tabla 29 se ha colocado los datos correspondientes al cruce de información entre cantidades de obra y actas, estos se agruparon en las actividades principales de mampostería y concretos, como base para la determinación de los indicadores de generación y aprovechamiento.

Tabla 29. Resumen de actas de obra del proyecto en el periodo de estudio

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	ACTA 11	ACTA 12	ACTA 13	ACTA 14	ACTA 15	ACTA 16	ACTA 17	TOTAL
			22/05	02/06	16/06	30/06	17/07	31/07	15/08	
4	Viga cimentación patios	Casa		5	18	33	3	38		97
5	Viga cimentación casas	Casa	12							12
7	Contrapiso cimentación (h =7cm)	Casa	12							12
11	Mampostería 1er piso	Casa	12	6						18
12	Dovelas 1er piso	Casa	12	6						18
13	Mampostería patio	Casa			10	30	48	20	14	122
14	Dovelas mampostería patio	Casa			5	30	31	22	17	105
15	Fundición losa piso 1 (e=10cm)	Casa	13	12						25
16	Fundición escalera	Casa	13	12						25
18	Mampostería 2do piso	Casa	18	14	6	6				44
19	Dovelas en 2do piso	Casa	16	10	10	6	2			44
21	Viga de amarre	Casa	36	12						48
40	Enchape fachaleta losa (1 hilada)	Casa	22	44	19	3				88
42	Enchape ladrillo en piña	Casa		25	19					44
49	Viga cinta cubierta	Casa	24		20	12	20	8	4	88
50	Sobre piso baño principal y vestier	Casa			14	18	26		12	70
	Mampostería	m ²	2.770,56	1.937,78	894	1.356	1.108,8	462	323,4	8.852,5
	Hormigones	m ³	228,71	86,59	52,54	53,79	44,89	44,34	11,2	522,1
	Grouting	m ³	40,36	23,14	15,5	13,08	7,3	3,08	2,38	104,8
	Mortero	m ³	38,94	26,52	8,46	8,46	0	0	0	82,4
	Mampostería	ton	277,1	193,8	89,4	135,6	110,9	46,2	32,3	885,3
	Hormigones	ton	548,9	207,8	126,1	129,1	107,7	106,4	26,9	1252,9
	Grouting	ton	90,8	52,1	34,9	29,4	16,4	6,9	5,4	235,9
	Mortero	ton	81,8	55,7	17,8	17,8	0,0	0,0	0,0	173,0
Peso total ejecutado en el periodo (ton):										2.547,1

4.6 Indicadores

Los indicadores se determinan a través de relaciones empíricas, las mismas que resultan del análisis de datos antes descrito y sirven de apoyo al proceso de gestión, en el control y seguimiento de la generación y aprovechamiento de RCD, un ejemplo del cálculo se detalla en el primer indicador calculado correspondiente al indicador propio del proyecto.

- Indicador del proyecto, peso del proyecto vs área del proyecto, expresado en ton/m²

$$WTA = \frac{W_{mat}}{A_t} = \frac{8.988,14ton}{12.381,6m^2} = 0,725 ton/m^2 = 725kg/m^2 \quad (1)$$

donde:

W_{mat} : Peso total de materiales usados, obtenido de Tabla 26.

A_t : área total de construcción.

Este indicador es el reflejo del consumo de materiales respecto al sistema constructivo empleado en el proyecto, de esta forma en comparación con otras metodologías usadas (ver Tabla 30), podemos determinar que el proyecto se encuentra dentro del rango estimado de consumo por m², considerando que se lleva el registro únicamente de la etapa de estructura.

Tabla 30. Consumo de materiales de construcción según sistema constructivo en Santiago de Cali (ACODAL, 2017).

Materiales	Industrializado (kg/m² - %)	Mampostería Estructural (kg/m² - %)	Mampostería Confinada – Pórticos (kg/m² - %)
Agregados triturados	542,19 – 42,7	404,05 – 29,3	624,99 – 26,0
Arena de río	445,21 – 35,1	349,09 – 25,3	733,63 - 30,5
Cemento gris	156,74 – 12,4	138,78 – 10,1	306,12 – 12,7
Roca muerta - Tierra de excavación	46,60 – 3,7	152,24 – 11,0	372,52 – 15,4
Cerámica cocida	39,98 – 3,2	301,28 – 21,9	358,08 – 14,9
Acero	26,68 – 2,1	20,31 – 1,5	9,44 – 0,4
Madera	5,02 – 0,40	3,58 – 0,26	0,13 – 0,0
Teja de fibro-cemento	3,15 – 0,25	5,92 – 0,43	-
PVC	2,35 – 0,19	2,06 – 0,15	2,39 – 0,1
Cobre	0,42 – 0,03	0,13 – 0,01	-
Cemento blanco	0,37 – 0,03	0,48 – 0,03	-
Pinturas	0,32 – 0,03	0,55 – 0,04	-

4.6.1 Indicadores de Generación de RCD macro

- Indicador de Generación Volumen del RCD Vs Área Edificada, expresado en m³/m²

$$IGR_v = \frac{VRCD_i}{A_i} \quad (2)$$

- Indicador de Generación Masa del RCD Vs Área Edificada, expresado en kg/m²

$$IGR_w = \frac{WRCD_i}{A_i} \quad (3)$$

- Indicador de Generación Masa del RCD vs masa edificada, expresado en ton/ton o kg/kg

$$W_{GR} = \frac{WRCD_i}{WTA * A_i} \quad (4)$$

En la Tabla 31 se muestra los indicadores obtenidos para cada tipo de residuo según la generación registrada, el área edificada para el cálculo se obtuvo del análisis de avance de obra en actas (ver Tabla 29), correspondiente a 5086,6 m². La transformación de RCD de volumen a peso se obtuvo en base de los datos obtenidos en el ensayo de peso unitario (ver Tabla 18).

Tabla 31. Indicadores de generación de RCD macro

RCD	Volumen (m³)	Peso (ton)	IGRv (m³/m²)	IGRw (kg/m²)	WGR (ton/ton)
Contaminados	188,20	467,89	0,037	91,98	0,127
Aprovechables agregados	202,25	218,39	0,040	42,93	0,059
Aprovechables mixtos	96,53	226,39	0,019	44,51	0,061
Aprovechables otros usos	7,53	10,59	0,001	2,08	0,003
Total	494,51	923,29	0,097	182	0,250

Se puede concluir entonces que el aprovechamiento de RCD dependiente netamente de la generación en etapa de estructura, según lo muestra el indicador WGR total de 0,250 ton/ton, no sería factible para el cumplimiento de la meta de incorporación del 30% requerida en la Resolución 0472 de 2017 del MADS y demandaría la reutilización del 100% del RCD generado, haciendo indispensable el uso de los residuos provenientes de etapa de excavación. Además, en comparación a resultados obtenidos de investigaciones llevadas a cabo en países como Brasil (ver Figura 39), podemos determinar que se encuentra dentro de la pérdida esperada en la actividad de construcción, siendo este un valor promedio para la región latinoamericana; mientras que con

relación a metodologías como la de Países bajos que se enfoca en la reducción, nuestra generación supera el doble de lo esperado, así en el contexto internacional a Colombia le queda un largo trayecto para establecer metas más acorde a su realidad.

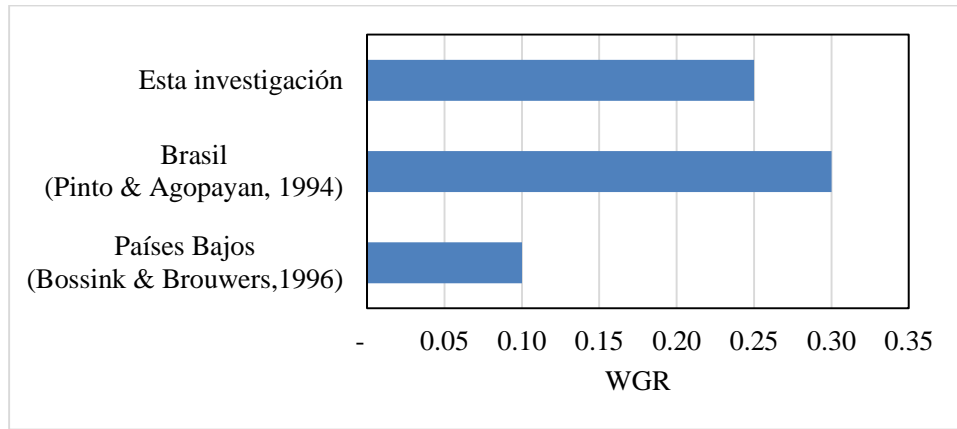


Figura 39. Índices de Generación WGR para distintos países.

En cuanto al indicador IGRw de 182 kg/m² se puede establecer una comparación frente a los 120 kg/m² de la generación esperada para obras de edificios nuevos según el Gobierno de Andalucía (2013), reiterando la superioridad de países con más trayectoria en la implementación de sistemas de gestión de RCD.

Del indicador IGRv total de 0,097 m³/m², se puede obtener una referencia de la producción de RCD relacionada a la metodología constructiva, la Figura 40 compara los índices calculados en investigaciones locales y otros estudios de relevancia para diferentes sistemas constructivos.

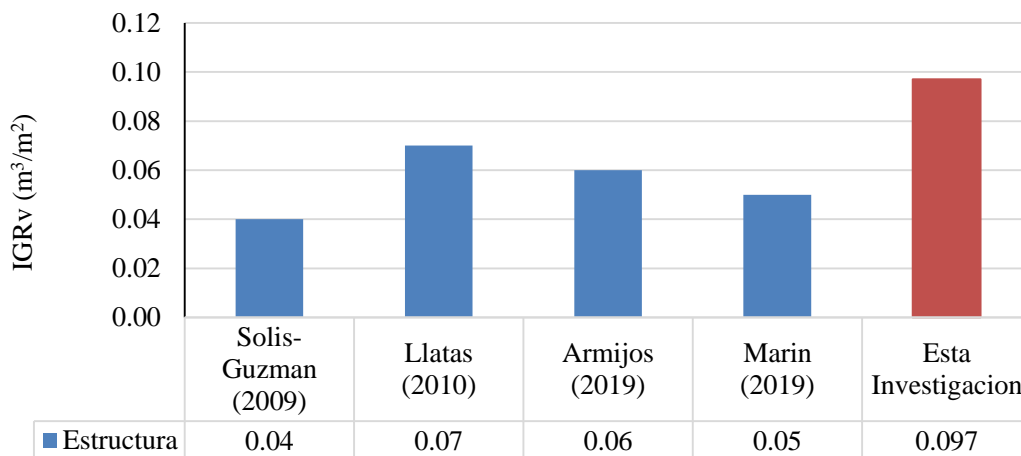


Figura 40. Índices de generación de RCD en etapa de estructura de diferentes autores.

Armijos (2019), evaluó la generación en cuatro proyectos habitacionales VIS en sistema industrializado ubicados al sur de Cali, conformados por torres de 5 pisos, obteniendo indicadores para la etapa de estructura de alrededor de 0,03 a 0,07 m³/m². Por su parte Marin (2019), estudió la generación detallada de un colegio en sistema aporticado, ubicado en el departamento de Caqueta, realizó un monitoreo constante por alrededor de un año, determinando un indicador de 0,05 m³/m² en etapa de estructura. Llatas (2011) y Solís-Guzman et al. (2009), referentes en el estudio de la generación de RCD en España, reportaron indicadores entre 0,04 a 0,09 m³/m² en la etapa de estructura del análisis por área en edificaciones con sistema estructural aporticado. En comparación con estos autores y como pudo observarse durante el monitoreo de obra, la mampostería estructural genera un alto porcentaje de residuos en comparación con sistemas tradicionales como el aporticado.

4.6.2 Indicadores de generación de RCD por etapa constructiva

Estos indicadores buscan expresar de manera específica la relación entre la generación y la actividad que lo produce, expresado en función de la unidad comúnmente usada para su cuantificación, por ejemplo, mampostería en m³/m². Para corresponder con estas actividades, la generación se desglosa en sus componentes con la aplicación de los porcentajes de composición determinados en el numeral 4.4.1, en la

Tabla 32 se muestra como quedarían distribuidos los RCD en relación a las visitas efectuadas.

Tabla 32. Desglose de la generación enfocada a los ARC

Medición	21/05	30/05	13/06	27/06	18/07	1/08	22/8	Total
Rc (m³)	13,15	6,76	22,05	21,86	12,14	4,95	21,30	102,2
Rb (m³)	28,12	15,67	30,74	40,22	47,81	35,94	80,90	279,4
Otros (m³)	21,74	7,01	18,52	27,29	10,63	3,42	24,27	112,9

Para la óptima distribución de los RCD entre las actividades ejecutadas, se apoya la separación de componentes con el enfoque de ARC, los Rb corresponden netamente a la actividad de mampostería y los Rc a los concretos, mientras de los otros residuos se dividen entre las actividades considerando las anotaciones hechas en campo en un 30% para los concretos y 70% para la mampostería en volumen.

Con estos indicadores se da también seguimiento al avance de obra y se observa su fluctuación según la cantidad ejecutada; para esto se ha considerado que en general debido a la dinámica de trabajo en la obra, existe una brecha de tiempo entre la ejecución y la medición del residuo de alrededor de 15 días, principalmente porque cuando se realiza la actividad el RCD queda disperso a lo largo de la obra y no es hasta la jornada de limpieza que se deposita ya sea en los acopios temporales u oficiales.

- Indicador de Generación en hormigones, volumen del RCD vs Volumen de concreto, expresado en m^3/m^3 (ver Tabla 33).

Tabla 33. Indicador de generación de RCD en concretos, incluye hormigón, grouting y morteros.

Descripción	Unidad	21/05	30/05	13/06	27/06	18/07	1/08	22/8	Total
RCD generado	m^3	19,67	8,87	27,61	30,05	15,33	5,98	28,58	136,08
Concretos	m^3	94,44	47,12	124,54	138,92	81,87	43,09	177,14	707,12
IGRv	m^3/m^3	0,21	0,19	0,22	0,22	0,19	0,14	0,16	0,192

En general este indicador varía entre 0,14 a 0,22 m^3/m^3 según las actividades ejecutadas, en comparación con la información registrada en la Tabla 29, podemos observar que los indicadores más altos se presentan al iniciar las vigas de patio y las viga cinta de cubierta.

- Indicador de Generación en mampostería, volumen del RCD vs Área de mampostería, expresado en m^3/m^2 (ver Tabla 34).

Tabla 34. Indicador de generación de RCD en mampostería

Medición	Unidad	21/05	30/05	13/06	27/06	18/07	1/08	22/8	Total
RCD generado	m^3	43,34	20,58	43,70	59,32	55,26	38,33	97,89	358,42
mampostería	m^2	781,56	390,78	894,00	1356,00	1771,80	1346,00	2312,40	8852,54
IGRv	m^3/m^2	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,040

La mampostería por su parte presenta valores entre 0,03 y 0,06 m^3/m^2 , el indicador aumenta en las etapas de mayor producción de mampostería, en este caso la ejecución de la mampostería de segundos pisos y luego se mantiene constante durante la ejecución de la mampostería de patios, que al ser menos compleja da menor espacio a error y por tanto menos piezas dañadas.

4.6.3 Indicadores de aprovechamiento

En estos indicadores se evalúa el potencial de aprovechamiento del RCD, por lo que se realiza una comparación entre el estado actual de la generación en el proyecto y la aplicación exitosa de la separación de componentes en el origen, la información se resume en la Tabla 35.

Tabla 35. Potencial de aprovechamiento con relación a la generación actual.

Componentes	Estado actual		Potencial de separación en el origen	
	Volumen (m ³)	Peso (ton)	Volumen (m ³)	Peso (ton)
Rc	58,4	136,6	102,22	239,3
Rb	204,7	478,4	279,41	653,0
Cartón	12,80	0,9	33,41	2,3
Madera	10,68	4,1	27,88	10,8
Metal	3,37	4,9	8,80	12,7
Plástico	15,40	2,0	40,19	5,2
Icopor	1,00	0,01	2,62	0,04
Total	306,31	626,9	494,53	923,3

La tabla anterior muestra que la separación adecuada de los residuos de construcción incrementa su potencial de aprovechamiento, los RCD que pueden ser aprovechados en usos diferentes a agregados de construcción se incrementan en un 161%, mientras que los residuos Rc y Rb se incrementarían en un 75 y 36% respectivamente con relación a la cantidad inicial. El menor incremento se presenta en el Rb debido a que en la zona de corte se concentra la mayor generación del mismo y la cantidad restante es la que resulta contaminándose por su acumulación en otros sitios de la obra. En este primer análisis se ve el impacto que la separación y almacenamiento adecuado puede generar en el incremento del potencial de aprovechamiento.

Por otra parte, en la Tabla 36 son calculados de forma separada los indicadores de generación por tipo de componente, los cuales corresponden al potencial de aprovechamiento total en la obra, comparados con los índices de generación esperados en obra nueva de edificio residencial según Ihobe SA/Gobierno Vasco, (2012), podemos establecer que la generación esperada en la etapa de estructura en el sistema de mampostería estructural supera los valores determinados por la referencia para edificación terminada, de aquí la importancia de establecer índices propios que reflejen la realidad del sector y los sistemas constructivos aplicados.

Tabla 36. Indicadores de aprovechamiento potencial de RCD.

Componentes	Volumen (m³)	Peso (ton)	IGRv (m³/m²)	Gob. Vasco (m³/m²)	IGRw (kg/m²)	Gob. Vasco (kg/m²)	WGR (ton/ton)
Rc	102,22	239,30	0,020	0,026	47,0	36,5	0,0649
Rb	279,41	653,00	0,055	0,041	128,4	36,6	0,1771
Cartón	33,41	2,30	0,007	0,012	0,45	0,83	0,0006
Madera	27,88	10,80	0,005	0,014	2,1	3,6	0,0029
Metal	8,80	12,70	0,002	0,002	2,5	0,65	0,0034
Plástico	40,19	5,20	0,008	0,010	1,0	1,58	0,0014
Icopor	2,62	0,04	0,001	-	0,01	-	0,00001
Total	494,53	923,30	0,097	0,105	182	79.78	0,250

Con una separación apropiada en el proyecto, de acuerdo con la generación de RCD analizada puede alcanzar el 25% del peso total de los materiales empleados en función del peso por metro cuadrado, cifra más cercana a la meta máxima de aprovechamiento del 30% propuesto por la Resolución 0472 de 2017 del MADS y en el Decreto 0771 de la Alcaldía de Santiago de Cali. Por tanto, con las metas actuales el único camino para cumplir con los mismos RCD generados en obra estaría en el aprovechamiento de los materiales de excavación o en importar residuos, lo que desvirtúa por si misma el objeto de la normativa, que si bien regula el aprovechamiento tiene como fondo la reducción del impacto ambiental de la generación de residuos la cual puede darse también a partir de la reducción misma de la generación.

4.7 Aprovechamiento del RCD en obra

En Colombia a pesar de los esfuerzos en el marco legal para el aprovechamiento del RCD, no se cuenta aún con una normativa específica sobre requisitos mínimos de las propiedades físicas para su uso en diversos fines, por esta razón la exigencia se basa en los parámetros aplicados a los áridos naturales en las especificaciones del INVIAS e INCOTEC; sin embargo es de esperarse que los agregados reciclados no muestren el mismo rendimiento, esto no limita su reutilización pero si abre el debate sobre el alcance de la reincorporación de RCD en las obras.

La Alcaldía de Bogotá lleva varios años realizando esfuerzos para la gestión del RCD, antes de la emisión de la Resolución 0472 de 2017 del MADS, organizando en diciembre de 2012 el Primer Foro Internacional para la Gestión y Control de los Residuos de Construcción y

Demolición; donde CEMEX presenta su propuesta en aprovechamiento y disposición de RCD, para su incorporación en concretos convencionales, de la que se extrae los resultados obtenidos en la caracterización de áridos reciclados de la zona, clasificándolos según su procedencia en RCD de concreto y RCD de ladrillo. Por otra parte el Gobierno Español a través del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX (2014), establece las propiedades físicas comunes halladas en los AR cerámicos o mixtos; en la Tabla 37 se realiza la comparación de los resultados obtenidos en esta investigación vs los agregados reciclados antes mencionados.

Tabla 37. Comparación de las características del ARC del proyecto vs agregados reciclados mixtos.

Descripción	Unidad	ARC Caracterizado		RCD Ladrillo	AR cerámicos
		Vivienda	Zona Corte	CEMEX (2012)	CEDEX (2014)
Masa unitaria suelta	kg/m ³	1.080	982	-	1.000 a 1.500
Desgaste	%	63%	57%	45 %	≤20% a 50%
Pasante Tamiz N° 200	%	3%	3 a 11%	11%	-
<i>Agregados Finos</i>					
Densidad bulk	g/cm ³	2,25	2,07	2,14	-
Densidad SSS	g/cm ³	2,42	2,41	-	-
Densidad	g/cm ³	2,70	3,16	-	-
Absorción	%	8%	12%	9%	≤30%
Módulo de finura	-	4,12	3,83	2,99	-
<i>Agregados Gruesos</i>					
Densidad bulk	g/cm ³	1,93	1,85	2,07	≥ 1,95
Densidad SSS	g/cm ³	2,18	2,17	-	≥ 2,15
Densidad	g/cm ³	2,57	2,71	-	-
Absorción	%	12%	17%	8,8%	6 a 25%
Módulo de finura	-	7,07	7,15	-	-

Según CEDEX (2014), se considera como áridos reciclados cerámicos aquellos que contienen al menos un 65% en peso de componentes como ladrillo mezclados o no con hormigón, y es debido a la variación en su composición, que las propiedades del AR cerámico presentan mayor diferencia en relación a otros de su clase, como se observa en los valores de porcentaje de desgaste; sin embargo podemos apreciar que las muestras caracterizadas se encuentran dentro de los parámetros esperados, en cuanto a densidad de la fracción gruesa, porcentajes de absorción y masa unitaria, con un pequeño margen para análisis. Si en cambio comparamos los resultados con

la caracterización de CEMEX, se puede destacar las diferencias en el módulo de finura del agregado fino y el contenido de material menor al tamiz N°200. En conclusión, bajo las observaciones de ambos organismos, no se recomienda el uso del AR del proyecto en concretos estructurales, pero si en elementos no estructurales, terraplenes y firmes para carreteras; no sin antes fijar distintos niveles de exigencia según el uso programado en obra.

4.7.1 Uso Potencial

- Concretos No estructurales

El primer parámetro a evaluar es la distribución granulométrica, que según las Normas y especificaciones INV Art-630-13, la granulometría de la mezcla de agregados grueso y fino debe ser continua y asemejarse a las curvas teóricas de Füller o Bolomey. En este caso se ha utilizado la curva teórica de Füller y sus límites; en la Figura 41 se observa la comparación con las muestras del interior de vivienda, que presentan una gradación continua y se encuentran en su mayoría dentro de los límites, requiriendo solo un ajuste de la fracción gruesa que puede ser corregido en el proceso de trituración o de clasificación por tamaño.

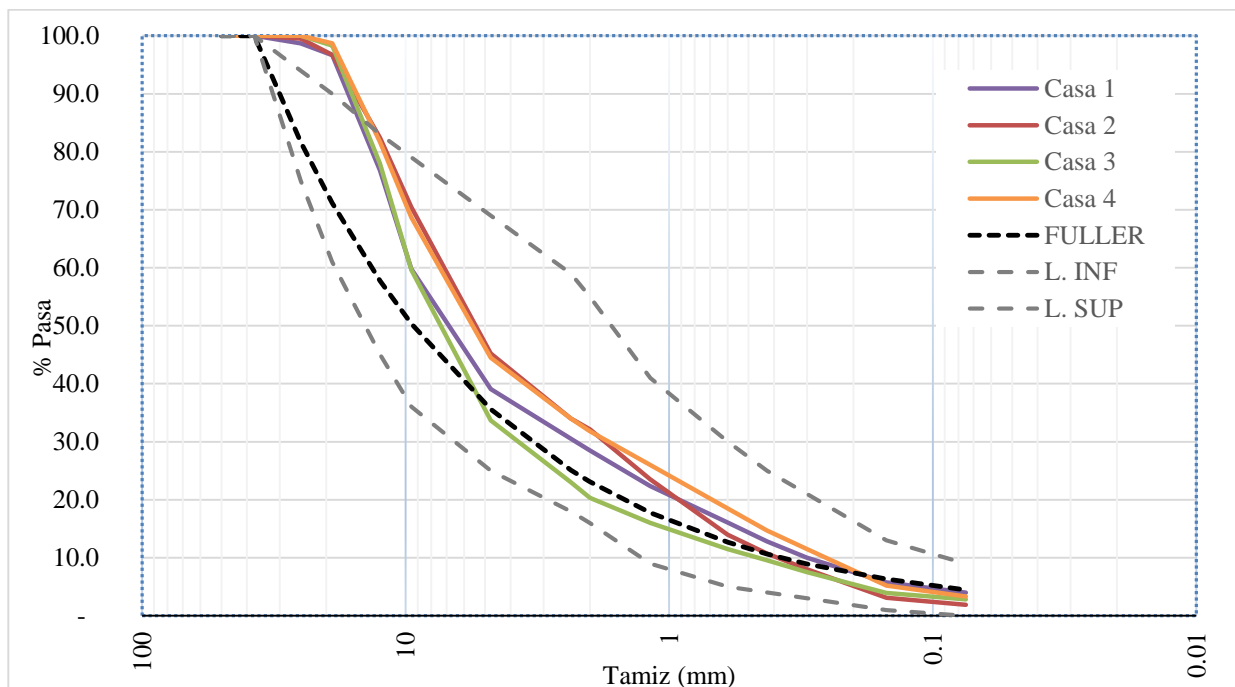


Figura 41. Comparación de granulometría muestras de ARC vivienda vs curva Füller.

Por otra parte en la Figura 42 se presenta las muestras de la zona de corte, en las que se observa variaciones considerables con respecto a la curva óptima, a pesar de esto y de encontrarse

algo fuera de los límites, sigue siendo viable como sustitución parcial o con el ajuste de su gradación en el tercio medio de la curva.

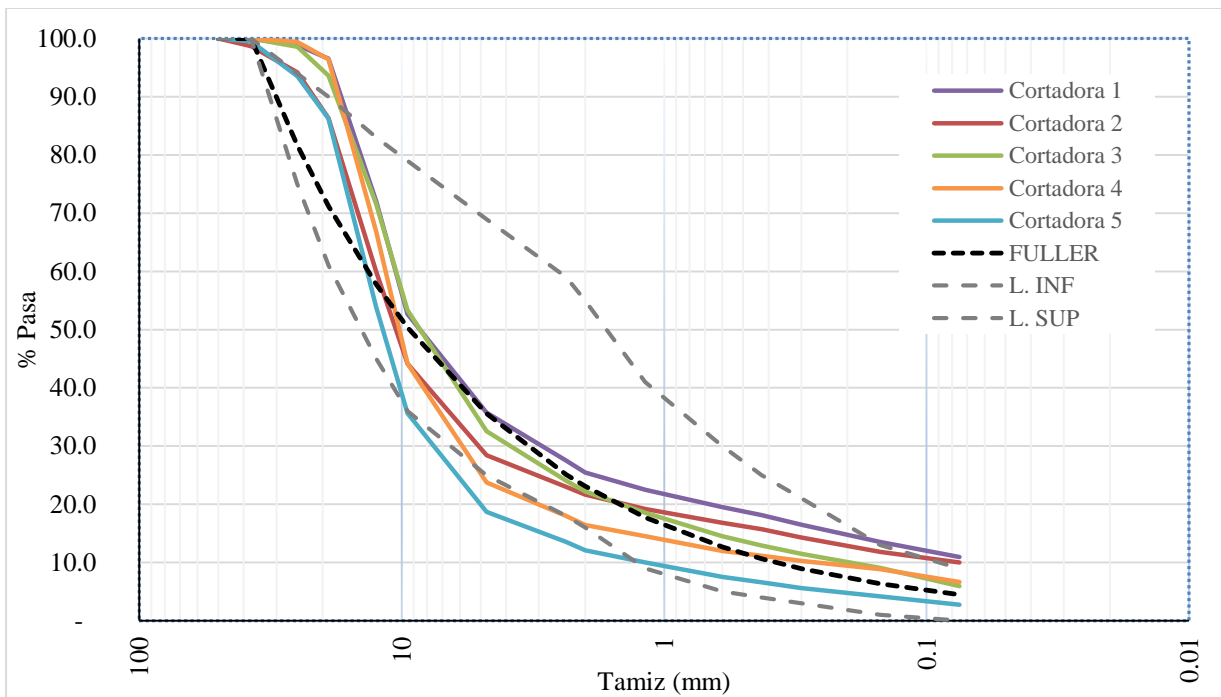


Figura 42. Comparación de granulometría muestras de ARC zona de corte vs curva Fuller.

Otros parámetros evaluados con relación a los requisitos de los agregados para concreto se detallan en la

Tabla 38, se incluye la norma NTC -174, aunque hace referencia únicamente al uso de AR procedentes de concreto triturado en la fracción gruesa, pero puede complementarse con los requisitos emitidos por CEDEX. Así, las muestras provenientes del interior de viviendas presentan un mejor margen de cumplimiento en cuanto a masa unitaria, porcentaje de finos, densidades y absorción, sin embargo, el alto porcentaje de desgaste puede limitar su uso dependiendo de la resistencia del concreto que se desee producir. Por otro lado, las muestras provenientes de la zona de corte demuestran un rango más amplio de incumplimiento, sobre todo en la fracción fina por características como módulo de finura, absorción y material pasante del tamiz N°200, sumado a que en conjunto se observa valores bajos de masa unitaria y alto porcentaje de desgaste. En conclusión, se podría decir que entre los RCD caracterizados, se recomienda el uso de los provenientes del interior de viviendas por sobre el producido en la zona de corte, para la incorporación en concretos no estructurales, no obstante, se puede evaluar la sustitución parcial

tomando en cuenta los ajustes necesarios a la granulometría del agregado y a la relación agua cemento del concreto.

Tabla 38. ARC caracterizado vs requisitos de ARC para concretos según CEDEX (2014) y NTC-174.

Descripción	Unidad	ARC Caracterizado		Agregados naturales NTC-174	AR cerámicos CEDEX (2014)
		Vivienda	Zona Corte		
Masa unitaria suelta	kg/m ³	1.080	982	-	1.000 a 1.500
Desgaste	%	63%	57%	35 %	≤ 50%
Pasante Tamiz N° 200	%	3%	3 a 11%	5 %	≤ 4 %
<i>Agregados Finos</i>					
Densidad bulk	g/cm ³	2,25	2,07	2,3 a 2,95	≤ 2,4
Densidad SSS	g/cm ³	2,42	2,41	-	≤ 2,5
Densidad	g/cm ³	2,70	3,16	-	-
Absorción	%	8%	12%	3%	≤12%
Módulo de finura	-	4,12	3,83	2,3 a 3,1	-
<i>Agregados Gruesos</i>					
Densidad bulk	g/cm ³	1,93	1,85	2,3 a 2,95	≥ 1,95
Densidad SSS	g/cm ³	2,18	2,17	-	≥ 2,15
Densidad	g/cm ³	2,57	2,71	-	-
Absorción	%	12%	17%	3%	≤20%
Módulo de finura	-	7,07	7,15	-	-

- Terraplenes

Según CEDEX (2014) el principal limitante para el uso de agregados reciclados cerámicos o mixtos, en terraplenes y capas de firme, es el contenido de sales solubles y yeso, que pueda causar reacciones expansivas, por lo que se busca que en lo posible se presenten condiciones adecuadas de homogeneidad y limpieza. En el caso de este proyecto, los RCD generados no se encuentran expuestos a este tipo de contaminante, por el nivel de acabados en el que se entregan las edificaciones, por lo que podría obtenerse material de propiedades óptimas para esta aplicación. En la

Tabla 39, se observa los parámetros granulométricos exigidos en las Especificaciones INV Art. 220-13, para suelos seleccionados que aplican a todas las partes del terraplén; ambas muestras cumplen con los requisitos para su uso en este fin.

Tabla 39. ARC caracterizado vs requisitos de materiales para terraplenes según INVIAS.

Descripción	Unidad	ARC Caracterizado		Suelos seleccionados
		Vivienda	Zona Corte	INV Art. 220
Tamaño máximo	mm	37,5	50	≤75
Porcentaje que pasa el tamiz de 2mm (N°10) en masa, máximo	%	28	19	≤80
Porcentaje que pasa el tamiz de 75µm(N° 200) en masa, máximo	%	3%	3 a 11%	≤25

- Afirmado, Sub-bases y Bases

Aunque no es común el uso de áridos reciclados en carreteras, se analizan los parámetros caracterizados frente a los requisitos de la normativa INVIAS. Para el caso de afirmados, en la Figura 43, se muestra la franja granulométrica requerida para la gradación A-25, como se establece en el Art.311-13; se observa que ninguna de las muestras se acopla a la distribución de partículas solicitada, sin embargo según las relaciones descritas en la Tabla 40, el material procedente de la zona de corte es el que más se acerca al cumplimiento de los requisitos establecidos, por el contrario con el material proveniente de viviendas requiere de un mayor porcentaje de finos.

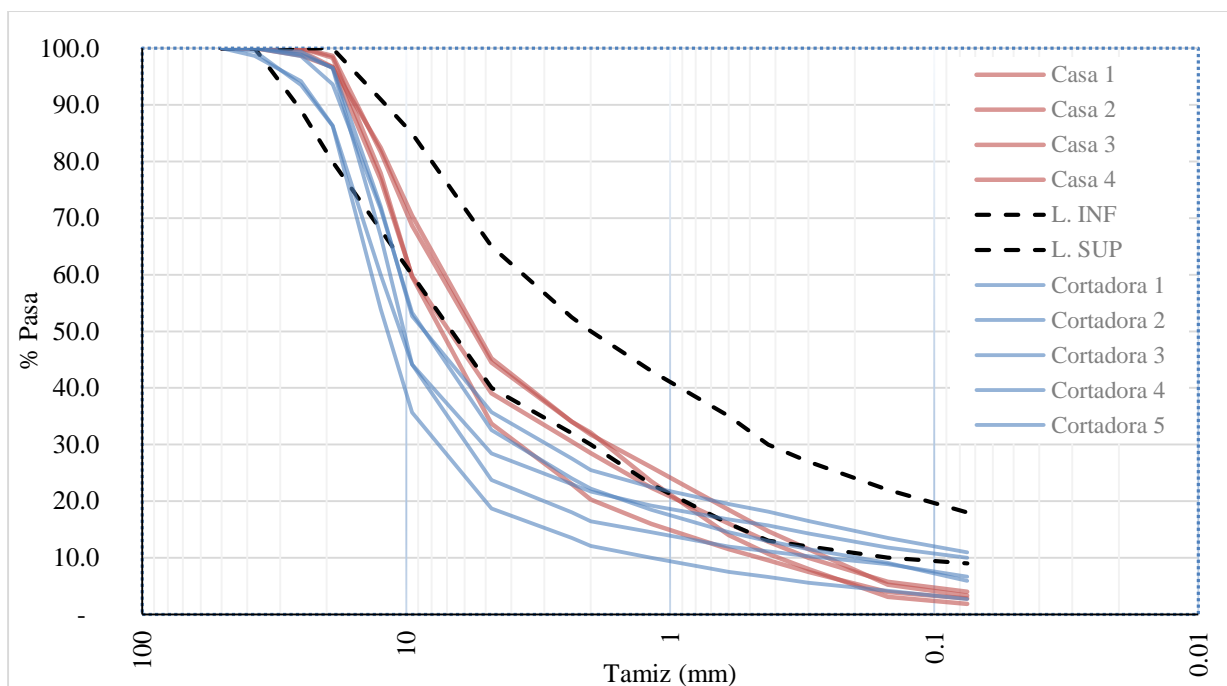


Figura 43. AR caracterizado vs franja granulométrica del material de afirmado INV Art.311-13.

Tabla 40. Muestras caracterizadas vs relaciones que debe cumplir el material de afirmado INV Art.311-13

Descripción	Requisito	Muestras de zona de corte					Cumple	Muestras de viviendas				Cumple
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	
N°200/N°10	0,2 a 0,45	0,43	0,46	0,27	0,41	0,23	Si	0,14	0,06	0,14	0,11	No
N°200/N°40	≤ 2/3	0,60	0,64	0,46	0,60	0,41	Si	0,31	0,17	0,30	0,23	Si
(1"-N°10)*N°4	16 a 34	26,2	20,6	24,9	19,9	15,2	Si	27,5	30,5	26,8	30,4	Si

Además, el porcentaje de desgaste en la máquina de los Ángeles, corresponde al 50%, mientras los AR evaluados se encuentran por arriba del límite con 63 y 57%, por lo que podrían ser considerados para la sustitución parcial del árido natural, complementando con los parámetros de limpieza y resistencia del material, establecidos para su uso.

En cuanto al uso potencial como material de sub-base, en la Figura 44 se muestra los áridos caracterizados en comparación con la franja granulométrica del material según INV Art. 330-13; podemos observar que en su mayoría los AR cumplen con la distribución solicitada y con la relación del pasante de los tamices N°200/N°40, que no excede de 2/3 (ver Tabla 40); aun así existe

la limitante del porcentaje de desgaste máximo permitido, que corresponde al 50% al igual que en los afirmados, por lo tanto su uso podría establecerse en sustitución parcial.

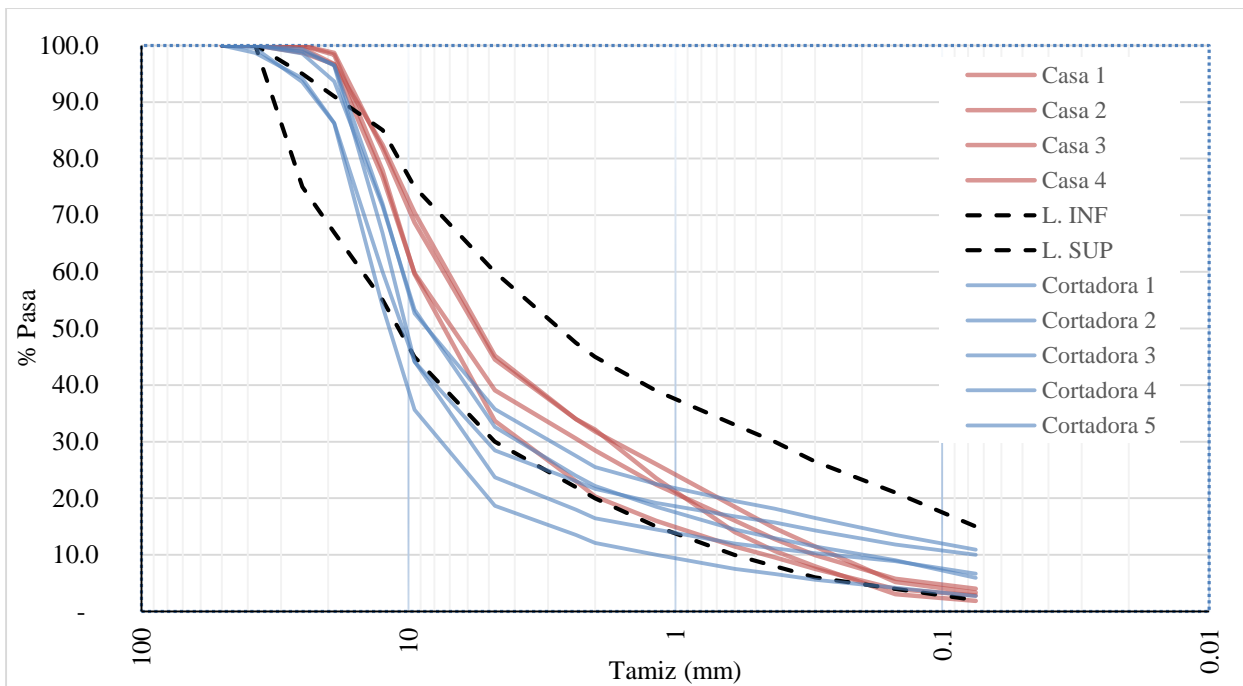


Figura 44. AR caracterizado vs franja granulométrica del material de sub-base granular INV Art.320-13

Sobre el uso potencial como base granular, cuyos parámetros se definen en el Art. 330-13 de las normas y especificaciones INVIAS; en la Figura 45 podemos apreciar que la franja granulométrica seleccionada, es a la que más se acopla la distribución granulométrica de los áridos reciclados, en comparación con el afirmado y sub-base, no obstante por la importancia de la base en la estructura del pavimento los requisitos son más exigentes, como en el caso del porcentaje de desgaste que es del 35% para la clase A y de 40% para las B y C; según esto el aprovechamiento sería limitado y requiere de la evaluación de otras características relacionadas a la dureza y durabilidad del árido.

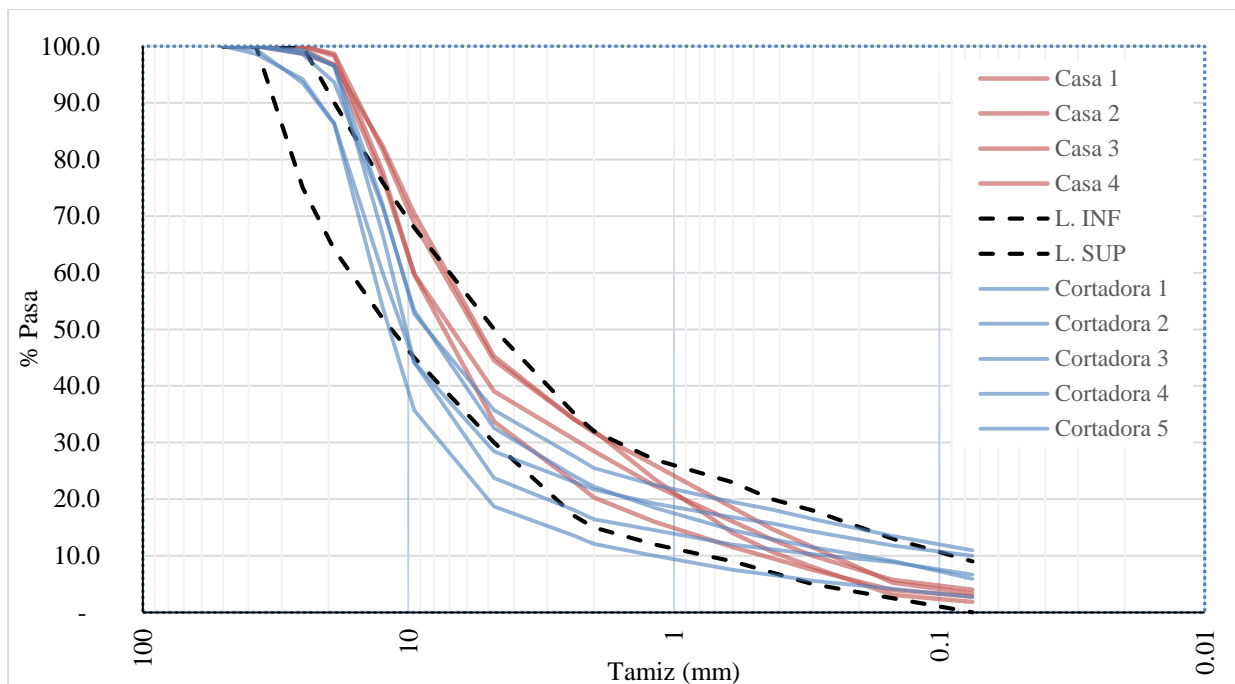


Figura 45. AR caracterizado vs franja granulométrica del material de base granular INV Art.330-13.

- Mezclas Asfálticas

Por ultimo en cuanto a la incorporación de AR en mezclas asfálticas, no se ha explorado el uso potencial debido a la contribución con relación al peso total de los materiales usados en el proyecto, sin embargo basados en los requerimientos de dureza del agregado provistos en el capítulo 4 de las normas y especificaciones INVIAS-13, determinan un valor de desgaste de 25 y 35% dependiendo de la aplicación y el nivel de tránsito, por lo que no se recomienda la incorporación del agregado caracterizado.

4.7.2 Oportunidades de aprovechamiento en obra

Con base en el cumplimiento de los requisitos normativos en los diferentes usos potenciales explorados, y la identificación de las necesidades del proyecto, se puede proponer dos alternativas de aprovechamiento en obra:

- Conformación de plataformas: Como proyecto piloto para el estudio del rendimiento de los áridos, se propone limitarse a la conformación final de las terrazas para antejardines y patios posteriores, cuyas sollicitaciones de carga son bajas. Además, como estas plataformas se construyen en la etapa final del proyecto, se tiene un amplio margen de tiempo para la recolección

y procesamiento de los RCD a áridos reciclados, pudiendo incluso establecerse tramos de prueba para el análisis y ajuste de las fórmulas de trabajo.

- Elementos no estructurales: Para esto se tomaría en cuenta elementos como bordillos, huellas para acceso a viviendas, sobre losas de baño y vestier, que son algunos ejemplos de las oportunidades de aprovechamiento; actualmente estos elementos se prefabrican en obra o se funden con mezcla preparada en sitio, por lo que la incorporación de los AR no supondría modificaciones de gran impacto en la dinámica de trabajo, pero si en la infraestructura del campamento, al incluir una estación para el procesamiento y control de las propiedades del RCD.

En todo caso, el primer paso para la ejecución de alguna de estas opciones, es la obtención de los áridos reciclados provenientes en su mayoría, a excepción de la zona de corte, de la recuperación de los RCD en las mezclas contaminadas de las escombreras, lo que implica la implementación de un plan de gestión de residuos de construcción y demolición en el proyecto.

5. DISEÑO DEL PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

5.1 Introducción

Se plantea un documento de aplicación a futuros proyectos, que abarque la gestión de RCD en todos sus aspectos, desde la proyección de la generación, las estrategias de gestión y el aprovechamiento en obra. Se realiza observaciones a prácticas y herramientas identificadas en el caso de estudio y se propone soluciones prácticas para su control; también se incluye una serie de anexos que sirvan de apoyo en la implementación y seguimiento.

5.1.1 Datos del generador

Nombre o Razón Social: CONSTRUCTORA SN

NIT: SN

Dirección de la obra: Sur de Cali, Área de expansión

Teléfono: SN

Correo electrónico: SN

5.1.2 Ubicación y descripción de la obra

Conjunto habitacional tipo VIS, dentro del macro proyecto SN, se desarrollara en un lote de 16135 m² ubicado en el área de expansión al sur de Cali

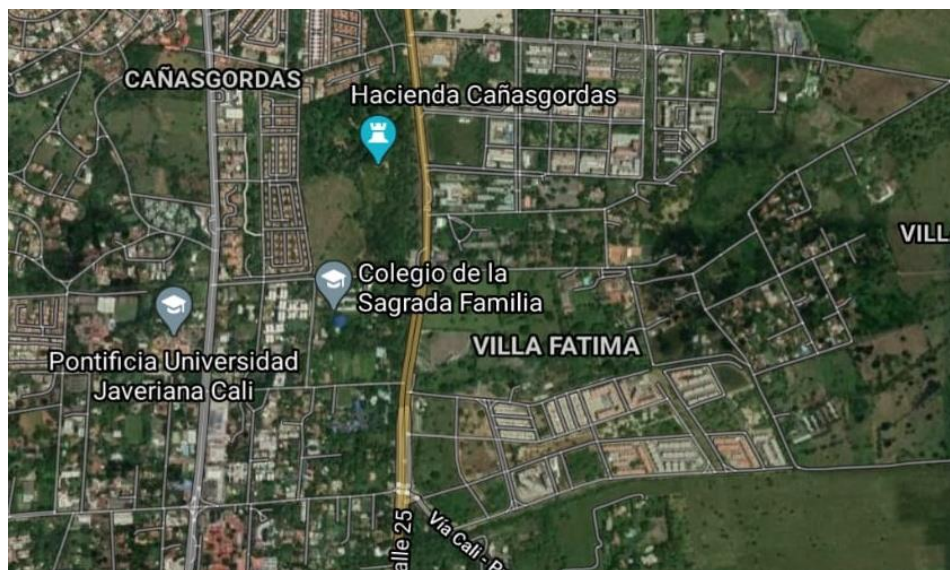


Figura 46. Ubicación general del proyecto

El proyecto está compuesto por 132 viviendas unifamiliares de dos plantas, en mampostería estructural, distribuidas en 3 manzanas de 44 casas cada una; con el desarrollo vial, servicios básicos y áreas verdes correspondientes.

5.2 Proyección de la generación de RCD

5.2.1 Índices de generación evaluados

Los índices a utilizar para el seguimiento y control de la generación son:

- IGRv: indicador de generación en volumen del RCD vs área edificada, expresado en m^3/m^2 , con un valor referencial histórico de $0,097 m^3/m^2$.
- IGRw: indicador de generación en peso del RCD vs área edificada, expresado en kg/m^2 , con un valor referencial histórico de $181,5 m^3/m^2$.
- WGR: Indicador de Generación Masa del RCD Vs Masa Edificada, expresado en t/t, con un valor referencial histórico de $0,25 ton/ton$.

Estos indicadores deben actualizarse con forme las etapas del proyecto de manera que el histórico de la generación de la empresa sea cada vez más exacto y refleje el avance en las políticas de gestión aplicadas.

5.2.2 RCD susceptible de aprovechamiento

Según el estudio de la generación realizado en proyectos similares previos, se espera los volúmenes descritos en la Tabla 41 para cada RCD total del proyecto, considerando la implementación de las estrategias de gestión que promuevan la recuperación de los residuos susceptibles de aprovechamiento.

Tabla 41. Proyección de la generación de RCD del proyecto en volumen y peso

Componentes	Volumen (m ³)	Peso (ton)
Rc	221,10	520,10
Rb	608,00	1.419,20
Cartón	77,40	5,00
Madera	55,30	23,50
Metal	22,10	27,60
Plástico	88,40	11,20
Icopor	11,10	0,10
Total	1.072,30	2.006,60

5.2.3 RCD no susceptible de aprovechamiento

En el estado actual de la organización de los proyectos, el RCD no susceptible de aprovechamiento ascienden a un IGRv de 0,037 m³/m²; el objetivo de este plan de gestión es reducir al máximo este indicador.

5.3 Estrategias para la gestión de RCD

El proceso de implantación del plan de gestión de RCD, contempla el desarrollo de un conjunto de actividades dentro de la obra, por lo que en primer lugar se deben determinar los agentes involucrados en el proceso de generación y asignar las responsabilidades correspondientes.

5.3.1 Agentes involucrados en la producción y gestión de RCD

Jerárquicamente todos los niveles del proyecto se comprometen en la implementación de la gestión de residuos y la adopción de los métodos y técnicas que estén de acuerdo con los objetivos establecidos por la empresa, pero las figuras principales involucradas en obra son:

- **Director de obra:** Se encuentra a cargo de la totalidad del proyecto, su logística, provisión de materiales y maquinaria, es el principal agente en la implementación del plan de gestión, al ser el líder del personal y la figura de autoridad en la obra, no tanto por la ejecución de las estrategias, que son delegadas al equipo de trabajo, pero si en la apertura a los cambios requeridos y la exigencia en el cumplimiento de los lineamientos adoptados.
- **Profesional SISOMA:** como parte de sus funciones es responsable de la implementación del plan de gestión, iniciando con el entrenamiento y motivación del personal, la supervisión de los procesos y el registro y control de indicadores. Apoya sus funciones en los otros técnicos a cargo de la obra.
- **Residentes de obra:** Responsables de impartir directrices y controlar la buena ejecución de las actividades en obra, está al frente de las cuadrillas y subcontratistas, e influye directamente en la aceptación que el personal da a los cambios en la dinámica de trabajo.
- **Cuadrillas de trabajo y subcontratistas:** son los generadores directos de los residuos al interior del proyecto, y por tanto los ejecutores de las actividades de gestión que se relacionan con la reducción, valorización y separación de los RCD

5.3.2 Medidas para la prevención de la generación de RCD

En base a la estimación de residuos, se establece aquellos a los que deben enfocarse las actividades de gestión, en el caso del proyecto se dirigen los esfuerzos a la obtención de agregados reciclados, para lo que se considera las siguientes operaciones.

- Reutilización: Uso de materiales en buen estado, los cuales se incorporan nuevamente en el proceso de construcción sin ser transformados, en esta categoría destacan la tubería, el acero y la madera.
- Valorización: Uso de residuos de construcción o demolición para ser aprovechados de alguna forma dentro o fuera de la obra, evitando que sean enviados a un vertedero, todos los RCD aprovechables en otros usos, papel, cartón, madera
- Reciclado: Operación de valorización que implica la transformación del residuo, RCD aprovechables como agregados provenientes de concretos y cerámicos.
- Eliminación: Envío de los residuos a un vertedero, todos aquellos que por sus características no puedan ser recuperados o se encuentren contaminados.

5.3.3 Medidas para la separación obligatoria en el origen (SSO)

La separación obligatoria en el origen (SOO), es la base fundamental de la gestión. Una correcta SOO garantizará el éxito del proceso, mientras que, si no se separan correctamente los residuos, se vuelve imposible el cumplimiento de las metas de aprovechamiento. Las bases que establecen la SOO incluyen tres aspectos:



Figura 47. Ejemplo de la separación de los RCD en sus componentes para el aprovechamiento

- Formación e Información: Tanto en materia de formación a trabajadores directos y subcontratas como de información a través de anuncios, señalizaciones y carteles de obra.
- Supervisión y Control: trabajo de supervisión y control de la buena conducta de los trabajadores en la obra para garantizar la correcta SOO.
- Contenedores y sistemas de acopio: utilización de sistemas de acopio tanto para recoger los residuos, acumulados en el perímetro de la obra, así como para la protección de los RCDs susceptibles de aprovechamiento.

5.3.4 Organización de obra y áreas para la disposición de RCD

Se propone soluciones de acopio, en las que se considera puntos definitivos necesarios para la organización y limpieza del proyecto, e instalaciones provisionales, que pueden habilitarse conforme a las necesidades y avance de obra.

- Contenedores de plástico al interior de las viviendas: deben ser resistentes y pueden ser acondicionados de los envases de materiales (cuñetes y canecas). En estos pueden disponerse tubería, maderas y metales de pequeño tamaño.
- Bolsas o sacos al interior de las viviendas: pueden ser utilizados en el embalaje de papeles, plásticos y otros materiales ligeros. El lugar de los sacos debe ser cubierto y protegido de lluvia.
- Estaciones Temporales: Las bahías se utilizan normalmente para el acondicionamiento de los residuos pesados como Rc y Rb, se propone ubicarlas en los antejardines, una estación por cada pacha de 6 viviendas.



Figura 48. Acopio temporal en proyectos vs propuesta de acopio temporal para la separación del RCD

- Cajones Estacionarios: Estos comúnmente tienen capacidad de 5m³, deben estar cubiertos y permitir la separación efectiva de los RCD, se ubican en el campamento de obra cerca de la zona de corte y pueden servir de almacenamiento de los agregados reciclados.



Figura 49. Acopios estacionarios en proyectos anteriores vs propuesta de cajones estacionarios.

5.3.5 Procedimiento de manejo para las actividades específicas

- Realizar compras a granel y promover el uso de envases de gran capacidad: Con esto se pretende minimizar la generación de RCDs procedentes de embalaje, como es el caso del cemento que puede ser comprado a granel, no sin antes asegurar un almacenamiento apropiado en obra.
- Manejo de productos peligrosos: Evitar la compra de estos productos en la medida de lo posible, asegurar el uso del contenido completo de aquellos envases, impedir la mezcla con residuos aprovechables.
- Coordinar el flujo de almacenamiento y suministro de materiales: Este procedimiento se enfoca principalmente al manejo de los ladrillos de mampostería, que son la materia prima más abundante. En primer lugar se requiere acondicionar el sitio de almacenamiento en el campamento de forma que el transporte y acomodación de los pallets sea lo más organizada y estable posible, en segundo lugar se determina el uso de la plataforma de patios posteriores para el suministro de materiales a las unidades, separando así del flujo de RCD que se localiza en los antejardines, ofreciendo una superficie estable para el emplazamiento de los pallets, por último se debe cuidar en lo posible el embalaje del producto, hasta su destino final en obra, para evitar escenarios como el mostrado en la Figura 49.



Figura 50. Dinámica de almacenamiento y flujo de distribución presentada en proyectos anteriores.

- Prohibir la disposición de los RCD en áreas no autorizadas: Se debe prohibir la disposición de los residuos de construcción en áreas no autorizadas dentro del proyecto, cuidando especialmente la separación entre el flujo de disposición del RCD y el suministro de materiales, para lo cual la interventoría se debe llevar de forma organizada y constante, para acompañar la evolución de alguna posible mala práctica, se puede hacer uso de las multas a contratistas de ser el caso.

5.3.6 Acciones de orientación a agentes involucrados

- Entrenamiento Inicial

La formación preliminar se lleva a cabo mediante una conferencia en presencia de la dirección de la empresa y el equipo de gestión de la obra (ingenieros, maestros, carga administrativa, responsable de la calidad, seguridad y suministros), esta reunión tiene los siguientes objetivos:

- Sensibilizar al equipo sobre los impactos ambientales causados por las actividades de construcción y demolición en las ciudades
- Mostrar cómo las leyes y las nuevas directrices establecen un nuevo panorama para la gestión integrada de estos residuos y cuáles son las implicaciones para el sector
- Establecer las modificaciones que pueden ocurrir en el día a día de las obras en función de la implantación del Plan de Gestión de RCD
- Repasar las herramientas y estrategias utilizadas en el Plan de Gestión

Además del entrenamiento con todo el equipo de trabajo (empleados y terceros), se realiza un entrenamiento específico con los responsables del control de la destinación de los residuos,

orientándolos en cuanto a las soluciones adecuadas e implementando controles operativos, introducción a los formatos de implementación.

- **Formación continua**

Denominado plan de comunicación y educación ambiental, contiene algunas acciones de educación ambiental para los trabajadores de la construcción civil. Para iniciar los trabajos con los empleados es necesario abordar el tema promoviendo charlas, en las que se subrayan las metas de minimización, reutilización y separación de los residuos de construcción y demolición en su origen. Esta comunicación se realiza periódicamente, por medio de carteles, murales y no necesita ser necesariamente de residuo de construcción. El empleado acabará pensando de modo ecológicamente correcto en toda su jornada, pues el beneficio es para su vida.

5.3.7 Fiscalización y control de los agentes involucrados

Después de realizado el proceso de gestión de los residuos de construcción y demolición, se debe implantar el programa de fiscalización. Este garantiza el funcionamiento de las acciones propuestas, se deben fiscalizar, sobre todo, los ítems descritos a continuación:

- Cuantificación semanal de los residuos sólidos generados por clase / tipo de residuo (ver Anexo).
- Acciones del personal de obra, en cuanto al correcto uso de los puntos de recolección.
- Registro y control, de manera que sea posible la evaluación periódica de su eficacia y perfeccionamiento (ver Anexo).
- Cuantificación mensual de la cantidad de material utilizado para la ejecución de obra en peso.

La implantación gradual y monitoreada de los puntos de recolección facilita un mejor análisis de las posibilidades de optimización de las unidades de recepción de RCD.

5.3.8 Indicadores de gestión

Como indicadores se adoptan los sugeridos para el Distrito Capital de Bogotá, mediante la Resolución N° 00932 de 2015 de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá D.C., los cuales se describen a continuación.

- **Indicador de eficiencia**

Este indicador permite conocer la inversión realizada mes a mes por parte del generador en la gestión de los RCD de la obra, con respecto a lo calculado en la fase de planeación y presentado en el Plan de Gestión de RCD.

$$\frac{\text{Gastos mensuales de la implementación del PG – RCD}}{\text{Presupuesto planeado para el PG – RCD}} \times 100$$

- **Indicador de eficacia**

Este indicador permite controlar el volumen de RCD aprovechados en la obra respecto a los generados, y verificar el cumplimiento del porcentaje definido por la Resolución N°0472 de 2017 del MADS, de acuerdo con el año de vigencia.

$$\frac{\text{Cantidad en peso de residuos aprovechados por mes}}{\text{Cantidad de material en peso usado para la ejecución de la obra por mes}} \times 100$$

- **Indicador de efectividad**

Este indicador permite hacer el seguimiento a las cantidades generadas mes a mes de RCD y control a los datos reportados a la entidad de fiscalización competente.

$$\frac{\text{Cantidad en volumen de RCD enviados a disposición final por mes}}{\text{Cantidad en volumen de RCD generados en el mes}} \times 100$$

5.4 Gestores del RCD

Como el generador tiene la obligación de velar por los RCD hasta su disposición final, se debe identificar y llevar el registro, a través de formatos (ver Anexos), de los residuos que se entregan a terceros, por lo que se debe considerar gestores para los siguientes casos:

- Transporte y disposición final de RCD contaminados, peligrosos y no susceptibles de aprovechamiento.
- Gestores de RCD aprovechable en otros usos, como plástico y cartón
- Gestores de RCD de acero

5.5 Vinculación del PGRCD al aprovechamiento de RCD

De acuerdo con la generación detallada de residuos mostrada en la Tabla 41 fueron corregidas las cantidades con una contaminación o pérdida de aprovechamiento del 30%, en los residuos que más se manipulan en obra, tales como el Rb, Rc y la madera, de esta forma se

proyectaron los tipos de RCD que deberán separarse obligatoriamente en origen (todos los listados en la Tabla 42), cuales se valorizarán y cuales tendrán disposición final.

Tabla 42. Reutilización, valorización o disposición final.

Tipo de residuo después de la clasificación	Volumen corregido (m³)	Peso corregido (ton)	Tipo de acción	Cliente
Rc	155	364	Reciclado	La obra
Rb	426	993	Reciclado	La obra
Cartón	54	4	Valorización	Externo
Madera	39	17	Reutilización	Externo
Metal	22	28	Valorización	Externo
Plástico	88	11	Valorización	Externo
Icopor	11	0,1	Disposición final	N/A
Contaminados	287	590	Disposición final	N/A
Total	1.072	2.007		

En proyectos anteriores se llevaba a cabo el uso del RCD para diversas actividades en obra, pero de forma no regulada (ver Figura 51 y Figura 52); por tanto, se busca vincular el Plan de gestión de RCD al proyecto de aprovechamiento en obra. El éxito de la implantación de las estrategias de gestión mantendrá el suministro de la materia prima, residuos aprovechables como agregados, que para su transformación en áridos reciclados requieren de un punto de almacenamiento o acopio y de una estación de procesamiento, donde sean limpiados manualmente de cualquier residuo que haya sobrepasado la separación en el origen; posteriormente triturados y tamizados, para la obtención de la granulometría requerida según el destino de aprovechamiento y por último la toma de muestras y ensayos que aseguren la calidad del producto final en obra.



Figura 51. Uso de RCD provenientes de la zona de corte como material de lastre para mejorar el tránsito de volquetas.



Figura 52. Uso de RCD como material de relleno en elemento no estructural.

5.6 Presupuesto estimado para la implementación

Como parte fundamental del plan de gestión, se deben destinar los recursos necesarios para la implementación de las estrategias que resulten en el aprovechamiento de los RCD en obra. Los ítems detallados en la Tabla 43 representan un 0.65% del presupuesto del proyecto, se considera:

- El personal a cargo de la supervisión y control de las actividades del plan, con su oficina dentro del campamento.
- Los medios para una exitosa separación en el origen, que incluyen desde la señalización, estaciones temporales, estación final y los envases necesarios para clasificar cada residuo según se estableció en el numeral 5.3.4
- El transporte interno, movimiento interno de residuos desde estaciones temporales a estación final, mediante el uso de mini cargador, que se realizara con frecuencia semanal paralelamente al registro de la generación
- Transporte en volqueta a disposición final de aquellos residuos clasificados como contaminados
- Recursos para la valorización y procesamiento en obra, que comprenden el personal para limpieza y trituración; así como los equipos requeridos para la obtención de agregados reciclados, depreciados a 5 años y cargados en costo al proyecto dentro de su plazo ejecución.
- Controles de calidad definidos en ensayos según la actividad de aprovechamiento implementada en obra.

Tabla 43. Presupuesto del plan de gestión

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	V. Unitario	V. Total
1	Supervisor	mes	15	3.120.000	46.800.000
2	Oficina en campamento	global	1	600.000	600.000
3	Estación definitiva	global	1	300.000	300.000
4	Estaciones temporales	u	24	50.000	1.200.000
5	Cuñetes plásticos	u	176	12.000	2.112.000
6	Sacos	u	880	1.500	1.320.000
7	Bolsas x 10	u	495	4.000	1.980.000
8	Señalética	global	1	4.500.000	4.500.000
9	Transporte interno	día	60	380.000	22.800.000
10	Transporte a disposición final	m ³	287	20.700	5.940.900
11	Personal para limpieza y trituración	mes	15	4.361.000	65.415.000
12	Trituradora	u	1	3.750.000	3.750.000
13	Zaranda	u	1	7.500.000	7.500.000
14	Ensayos de laboratorio	mes	15	450.000	6.750.000
				TOTAL	\$ 170.967.900

6. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de las observaciones de campo del estudio de caso, así como de los análisis de laboratorio y de la formulación del plan de gestión de RCD, finalmente se proponen unas recomendaciones para trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

A partir del análisis de la generación de residuos en obra, sin acciones de gestión específicas, se identificó que sólo el 41% del volumen total de residuos podría ser empleado como agregados después de su transformación, por ejemplo, limpieza, trituración y clasificación por tamaño.

De los residuos no susceptibles de aprovechamiento denominados como contaminados, se puede concluir con base a la generación y disposición observadas en obra, que además de ser la segunda fracción más alta, correspondiendo al 38% de los RCD, cuentan con un elevado potencial de recuperación, si se implementan las estrategias de gestión apropiadas.

Asociado al sistema constructivo del proyecto, se identifican las estaciones de corte de ladrillo como puntos clave en la generación y gestión del RCD, ya que el 85% del material susceptible de aprovechamiento como agregados procede de esta actividad, estableciendo a los cerámicos provenientes de ladrillo, como el residuo más abundante en el proyecto y el menos susceptible de contaminación. De la caracterización de muestras recolectadas en esta zona se obtuvo los siguientes parámetros: en cuanto a la clasificación del ARC según la norma UNE EN 933 11- 2010, se mostró una uniformidad en su composición de casi el 100% de Rb y sin presencia de partículas flotantes; en relación al tamaño y distribución granulométrica, se presentó en promedio un 54% de grava y fracciones de material fino de hasta el 11%, que junto con los coeficientes de uniformidad y curvatura, clasifican al material como un árido de mala gradación; así mismo por las características propias del material cerámico, se determinó un porcentaje de absorción de alrededor del 17% y una resistencia al desgaste promedio de 59%.

Por otra parte las muestras recolectadas al interior de las viviendas reflejaron la composición típica de los RCD generados directamente por el proceso constructivo, siendo los Rc + Rb más abundantes, entre el 83 a 96% en volumen y 46 al 75% en peso; el resto de elementos se resumen en madera, metal, plástico y cartón, que al ser separados de la muestra permitieron realizar la caracterización como agregados reciclados según la norma UNE EN 933 11- 2010,

obteniendo que la composición del material y la cantidad de partículas flotantes, se encuentran dentro de los parámetros para su aprovechamiento; en cuanto al tamaño y distribución de partículas, según los coeficientes de uniformidad y curvatura obtenidos, se define como un árido de buena gradación con un promedio de 35% de grava y 62% de arena; por otro lado estas muestras obtuvieron una gravedad específica bulk de alrededor de 2.25% y valores de absorción entre 4.1 y 9.8%; sin embargo el parámetro en el que presento el menor rendimiento es la resistencia al desgaste, donde se obtuvo valores del 63%.

De los resultados obtenidos en la caracterización del RCD, se establece su aprovechamiento como agregados reciclados cerámicos, que según los parámetros exigidos en la normativa colombiana pueden utilizarse al 100% para la conformación de terraplenes; mientras que se recomienda la incorporación de forma parcial para concretos no estructurales, afirmados y sub bases; quedando excluido su uso en bases.

En cuanto al cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 del MADS, se establece que en las condiciones actuales del proyecto la capacidad de aprovechamiento de RCD corresponde a tan solo el 5,9% pudiendo alcanzar el 25% del peso total de los materiales empleados en función del peso por metro cuadrado, cifra más cercana a la meta máxima de aprovechamiento del 30%; sin embargo esto implica el aprovechamiento al 100% de todos los residuos generados en la etapa de estructura y por tanto, el único camino para cumplir la meta propuesta con los mismos RCD generados en obra estaría en el aprovechamiento de los materiales de excavación.

El indicador de generación IGR^v obtenido para la etapa de estructura correspondiente a 0.097m³/m², refleja la producción de RCD en sistemas de mampostería estructural, siendo superior a los obtenidos en investigaciones de otros sistemas constructivos usados en el medio como el industrializado y el dual. Estos indicadores conforman una base para la proyección de la generación en proyectos futuros y deben ajustarse según los cambios presentados en obra y los esfuerzos de gestión a realizar.

Las condiciones actuales de obra permiten formular estrategias de gestión integral que en muchos de los casos requieren de pequeños ajustes a los procedimientos y la infraestructura existente, sin embargo se establece que el principal reto en la implementación, es la constancia en las actividades de orientación para lograr una cultura del reciclaje en el personal; por esto las responsabilidades de los agentes involucrados en la gestión deben ser claras y estar enfocadas en

el cumplimiento de las medidas para la prevención de la generación y la separación obligatoria en el origen, de este éxito depende la obtención de RCD aprovechable como agregados y en otros usos.

La organización de obra y la ubicación de los elementos para la disposición de residuos también juegan un papel protagónico para el éxito de la separación en el origen, como en el caso de los acopios temporales y definitivos, así se establecen contenedores específicos para la clasificación de los residuos según su tipo; además de procedimientos definidos para actividades como el almacenamiento y suministro de materiales, que eliminan la producción innecesaria de RCD.

Por último, la fiscalización y control en la implementación del plan de gestión aseguran el éxito a largo plazo, requiriendo de actividades específicas de supervisión del personal, manejo de los formatos de registro, cuantificación de la generación de RCD y del material utilizado en obra, y por último el seguimiento de los indicadores de gestión, que reflejan la eficiencia, eficacia y efectividad del plan de gestión.

6.2 Recomendaciones para trabajos futuros

Como continuación de esta línea de investigación, se sugiere abordar los siguientes temas en investigaciones futuras:

- Análisis de generación de RCD en diferentes sistemas constructivos, tales como, las edificaciones aporticadas para uso como vivienda que no han sido abordadas por esta línea de investigación.
- Implementación de las estrategias de gestión en proyectos similares y evaluar su efectividad y eficacia.
- Estudio de la incorporación parcial y total de RCD a diferentes opciones de aprovechamiento en concretos y rellenos sobre estructuras.
- Ejecución de un proyecto de aprovechamiento en obra considerando los resultados acá mostrados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 932-2, U. E. (2009). Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras en el laboratorio.
- Acevedo, C. D. (2013). Evaluación de la factibilidad de obtención de argamasa a partir del aprovechamiento de ladrillo y mortero contenidos en escombros. Universidad del Valle.
- ACODAL, A. C. de I. S. y A. S. O. (2017). Caracterización exhaustiva de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) que ingresan a la Estación de Transferencia de la carrera 50 de la ciudad de Cali e identificación de su potencial de transformación en eco productos para la construcción.
- Aguilar, A., Gómez, J., & Rojas, M. (2017). Physicochemical, Mineralogical and Microscopic Evaluation of Sustainable Bricks Manufactured with Construction Wastes. *Applied Sciences*, 7(10), 1012. <https://doi.org/10.3390/app7101012>
- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C./ Secretaria Distrital de Ambiente. (2015). Guía para la elaboración del plan de gestión de residuos de construcción y demolición RCD en la obra, 71.
- Angulo, S. C. (2005). Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. *Escola Politécnica*. Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.3.2005.tde-18112005-155825>
- Armijos, J. (2019). Caracterización De Residuos De Construcción En Sistemas Industrializados Para Viviendas De Interés Social, En La Ciudad De Santiago De Cali.
- Asenjo, M. A. (2008). Los residuos de construcción y demolición. *Noveno Congreso Nacional del Medio Ambiente CONAMA*.
- Bossink, B. A. G., & Brouwers, H. J. H. (1996). Construction Waste: Quantification and Source Evaluation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(1), 55-60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1996\)122:1\(55\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:1(55))

- Brick, K. (2008). Barriers for implementation of the Environmental Load Profile and other LCA-based tools.
- Bueno, C., Jaenisch, R., Martins, J. C., Casarotto, S., Moraes, J. A., Silva, A. L., & Nara, E. O. (2013). Caracterización cuantitativa y cualitativa de los residuos de la construcción sólida para nuevas construcciones de edificios. *Universidad de Santa Cruz do Sul*, 1-8.
- Caicedo, C. S. (2016). Diseño de un pavimento articulado con adoquines compuestos por reciclados de concreto como agregado fino y cenizas provenientes del bagazo de la caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento portland. Pontificia Universidad Javeriana de Cali.
- Caicedo, S. L., & Perez, J. M. (2014). Estudio del uso agregados reciclados de residuos de Construcción y/o demolición (RCD) provenientes de la ciudad de Cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto, caso de los adoquines. Pontificia Universidad Javeriana De Cali.
- CEDEX. (2014). Catalogo de Residuos Utilizables en Construcción. Recuperado de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/valorizacion/propiedades-del-material-procesado/202/arido-reciclado-procedente-de-hormigon.html>
- CEMEX. (2012). Aprovechamiento y Disposición de RCD. En *Primer Foro Internacional para la Gestion y Control de los Residuos de Construccion y Demolicion*.
- Comisión Europea. Decisión de la comisión de 18 de diciembre de 2014 por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo., 7 § (2014). Recuperado de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0955&from=ES>
- COMPETIR, P., SENAI, SEBRAE, & GTZ. (2006). Gestão De Resíduos Na Construção Civil: Redução, Reutilização e Reciclagem.
- CONAMA. Resolução nº 307, de 5 de Julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil., 2015 DOU nº 136 § (2002). Recuperado de <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>
- Contreras, M., Teixeira, S. R., Lucas, M. C., Lima, L. C. N., Cardoso, D. S. L., da Silva, G. A. C.,

- ... dos Santos, A. (2016). Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Construction and Building Materials*, 123, 594-600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.044>
- DAGMA. (2013). *Informe plan de desarrollo Cali 2012-2016*.
- El País. (2018, febrero 13). Cali genera casi un millón de toneladas de escombros al año, advierte Sociedad de Ingenieros. Recuperado de <http://www.elpais.com.co/cali/genera-casi-un-millon-de-toneladas-de-escombros-al-ano-advierte-sociedad-de-ingenieros.html>
- Embus, D. M., & Quintero, L. J. (2015). Influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como material de la estructura del pavimento. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- García, F. P., Martínez, Y. R., Sandoval, O. A. A., & Martínez, A. J. G. (2012). Recovery of Waste of Construction , Demolition and Mining Tailings, 2(7), 46-63.
- GEAR. (2011). Guía Española De Áridos Reciclados Procedentes De Residuos De Construcción Y Demolición (RCD).
- Gobierno Andalucia/Agencia de Obra Publica, AGRECA, A. de empresas gestoras de valorizacion de R., PAIDI, G. de investigación U. de C., & Enresa, C. de M. A. (2013). Gestión y tratamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) *Guía de buenas practicas*. (Ucop. E. U. de Córdoba, Ed.).
- González, J., Díaz, M. B., & Rodríguez, R. (2012). Código de ejecución segura y sostenible de demolición y desmantelamiento. *Materiales de Construcción*, 62(305), 115-129. <https://doi.org/10.3989/mc.2011.58210>
- Ihobe SA/Gobierno Vasco. (2012). Manual para la redacción de estudios de gestión de RCD en obras de edificación, rehabilitación y demolición. Recuperado de www.ihobe.net
- INV E 213-13. (2012). Análisis granulométrico de agregados grueso y fino, 1-9.
- INV E 217-13. (2012). Densidad bulk (Pero unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos, 1-8.
- INV E 218-13. (2012). Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 1/2) por medio de la Máquina de los Ángeles, 1-6.

- INV E 222-13. (2012). Gravedad específica y absorción de agregados finos, 1-8.
- INV E 223-13. (2012). Gravedad específica y absorción de agregados grueso.
- Jiménez, E., & García, H. (2016). Aprovechamiento de los RCD en proyectos de construcción y conservación de pavimentos urbanos. Universidad Católica de Colombia.
- Jovchelevich, R. (1994). Estudo revela desperdício na construção. Recuperado 18 de junio de 2018, de <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/1994/3/20/imoveis/2.html>
- Karpinsk, L. A., Pandolfo, A., Reinehr, R., Kurek, J., Pandolfo, L., & Guimarães, J. (2009). *Gestão diferenciada de resíduos da construção civil - uma abordagem ambiental*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Recuperado de <http://www.pucrs.br/orgaos/edipucrs/>
- Kien, T. T., Thanh, L. T., & Lu, P. V. (2013). Recycling construction demolition waste in the world and in Vietnam. *The International Conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future*, (March), 26-27. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/256492915%0ARecycling>
- Llatas, C. (2011). A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*, 31(6), 1261-1276. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.023>
- Londoño, J. A. (2016). Comportamiento mecánico de elementos prefabricados de concreto con agregados reciclados dentro de la fuente que los genera. Pontificia Universidad Javeriana, Cali.
- Lu, W. (2014). Estimating the Amount of Building-Related Construction and Demolition Waste in China. En *Proceedings of the 18th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate* (pp. 539-548). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-44916-1_52
- Mália, M., Brito, J. De, & Bravo, M. (2011). Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. *Ambiente Construído*, 11(3), 117-130. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000300009>
- Mañá, F., González, J. M., & Sagera, A. (2000). Plan de Gestión de Residuos en las obras de

construcción y demolición: Situación actual y perspectivas de futuro de los residuos de la construcción.

Marin, A. (2019). Análisis De La Generación De Residuos De Construcción Y Demolición (Rcd) En Un Proyecto Institucional: Estudio De Caso. *Pontificia Universidad Javeriana*. Pontificia Universidad Javeriana-Cali. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Mera, A. L. (2018, abril 15). Los botaderos de escombros, otro problema que desborda a Cali. *El Pais*. Recuperado de <http://www.elpais.com.co/cali/los-botaderos-de-escombros-otro-problema-que-desborda-a.html>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución Número 0472 de 2017, Diario Oficial 50.166 § (2017). Bogota, Colombia. Recuperado de <http://www.andi.com.co/Uploads/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>

Muñoz, D. M. E., Arias, L. J. Q., Benavides, C., & Otálvaro, I. F. (2015). Influencia del tiempo de curado en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como material de la estructura del pavimento D.M.

Nakajima, S., & Futaki, M. (2002). National R&D project to promote recycle and reuse of timber constructions in Japan e the second year's results. National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land Infrastructure and Transport, Tsukuba, Ibarak. Recuperado de <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://site.cibworld.nl/dl/publications/Publ272/japan.doc>

National Waste Plan. (2008). *The National Waste Management Plan Part 1 Policy framework Contents*.

Ortiz, O., Pasqualino, J. C., & Castells, F. (2010). Environmental performance of construction waste: Comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste Management*, 30(4), 646-654. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.013>

Ospina, M. Á., Moreno, L. Á., & Rodríguez, K. A. (2017). Análisis técnico-económico del uso de concreto reciclado y el concreto convencional en Colombia. *Actas de Ingeniería*, 3, 36-47.

Pacheco, C. A., Fuentes, L. G., Sánchez, É. H., & Rondón, H. A. (2017). Construction demolition waste (CDW), a perspective of achievement for the city of Barranquilla since its management

- model. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 533-555. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10174>
- Pinto, T. D. P., & Agopayan, V. (1994). Construction wastes as raw materials for low-cost construction product. En *In First International Conference of CIB*.
- Pontificia Universidad Javeriana Cali. (2017). Plan Piloto de Gestión y Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición.
- Poon, C. S., Yu, A. T. W., & Jaillon, L. (2004). Reducing building waste at construction sites in Hong Kong. *Construction Management and Economics*, 22(5), 461-470. <https://doi.org/10.1080/0144619042000202816>
- Quintero, L. A., & Lopez, D. C. (2015). Uso De Residuos De Construcción Y Demolición Reciclados (Rcd-R-R) Con Adición De Suelo Natural Como Maerial De Pavimentos. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Ramírez, J. C. (2014). Instrumentos para el mejoramiento en la gestión de la política de aprovechamiento de residuos de construccion y demolicion en Bogota D.C. a partir de las percepciones de los constructores de obras publicas. Pontificia Universidad Javeriana.
- Rengifo, D. V., & Chavez Landazuri, H. (2015). Influencia De La Composición En El Comportamineto Mecánico De Un Residuo De Construcción Y Demolición Rcd Como Elemento De La Estructura Del Pavimento. Pontificia Universidad Javeriana De Cali.
- Rojas, C. (2014). *Base técnica para legislar los residuos de construcción en el estado de Veracruz*. Universidad Veracruzana.
- Salazar, A. (2011). ¿Los escombros de construcción, son realmente un problema técnico? En *Seminario CAMACOL «Pasos firmes hacia la sostenibilidad en Colombia»* (p. 54).
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2012). RESOLUCIÓN No. 932, 1-26.
- Shafica Cadavid, A. (2015). Evaluación del manejo de residuos de construccion y demolición (RCD) en seis proyectos de viviendas de interés prioritario, como contribución a la revisión del panorama de gestión de RCD en la ciudad de Medellín, 1-13.
- Solís-Guzman, J., Marrero, M., Montes, M. V., & Ramírez, A. (2009). A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management*, 29(9), 2542-2548. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.009>

- Statistics Canada. (2015). Table 38-10-0034-01 Materials diverted, by type. Recuperado de <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=3810003401>
- Suzuki, H., Dastur, A., Moffatt, S., Yabuki, N., & Maruyama, H. (2010). *Eco2 Cities*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8046-8>
- Townsend, T., Wilson, C., & Beck, B. (2014). The Benefits of Construction and Demolition Materials Recycling in the United States. *CDRA White Paper*, (December), 60502.
- UNE EN 933-11. (2010). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- USEPA, U. S. E. P. A. (2016). Advancing sustainable materials management: 2014 Fact Sheet. *United States Environmental Protection Agency, Office of Land and Emergency Management, Washington, DC 20460*, (November), 22. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/2014_smmfactsheet_508.pdf
- Wedler, B., & Hummel, A. (1946). *Trümmerverwertung und Ausbau von Brandruinen*. (Berlín, Er).

ANEXOS

Formatos implementación plan de gestión de RCD

A continuación, se presentan los formatos destinados al apoyo de la implementación y seguimiento del plan de gestión del RCD, en su mayoría se enfocan como herramientas de manejo interno, pero también se han incluido aquellos que por decreto deben emitirse desde el proyecto a entidades externas y de regulación.

Medición y Control de movimiento interno de residuos

Fecha:

Responsable:

Tipo de residuo	Medición								Origen	Destino	Observaciones
	H (m)	B (m)	L (m)	b (m)	l (m)	A _B (m ²)	A _C (m ²)	V (m ³)			
Material de excavación											
Rc: concretos											
Ru: agregados											
Rb: cerámicos											
Rc + Ru											
Rc + Rb											
Plásticos											
Papel / cartón											
Metales											
Vidrio											
Madera											
Contaminado											
Otros											

$$A_B = B \cdot L \quad A_C = b \cdot l \quad V = \frac{1}{3} H (A_B + A_C + \sqrt{A_B \cdot A_C})$$

Calculo de Volúmenes

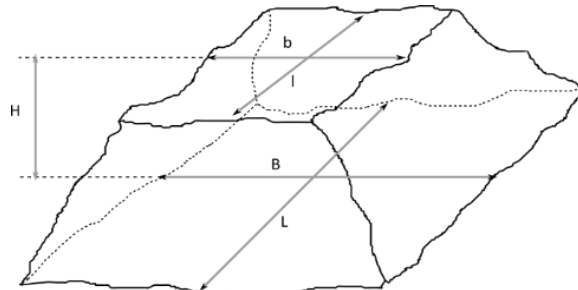
H: altura promedio de la pila

B: ancho promedio de la base de la pila

L: largo promedio de la base de la pila

b: ancho promedio de la corona de la pila

l: largo promedio de la corona de la pila



Formato de seguimiento y aprovechamiento de los RCD en Obra

Etapa	Clasificación del RCD		Observación estado del RCD	Cantidad proyectada de RCD a generar en obra (m3)	Tratamiento			Lugar de disposición	Periodo de reporte		Acumulado	
					Disposición final	Reutilización directa	Reciclaje o Aprovech		Cantidad real generada	Observaciones a la generación	Cantidad real generada	
Excavación/ Estructura/ Acabados	Productos de excavación	Tierra										
		Otros										
	Residuos reutilizables o reciclables como agregados	Rc: concretos										
		Ru: agregados										
		Rb: cerámicos										
		Rc + Ru										
		Rc + Rb										
		Otros										
	Residuos reciclables a otros destinos	Plásticos										
		Papel / cartón										
		Metales										
		Vidrio										
		Madera										
		Otros										
	Residuos para los que no se han desarrollado tecnologías o aplicaciones económicamente viables para su reciclaje	Yeso										
		Aislantes										
		Caucho										
		Asbestos										
		Otros										
	Desechos peligrosos derivados del proceso de construcción	Contaminados										
		Peligrosos										
		Otros										

Informe de aprovechamiento en sitio, Anexo II Formato certificado de aprovechamiento de RCD del Decreto 0771-2018 Alcaldía de Cali

CERTIFICADO DE APROVECHAMIENTO DE RCD INSITU Y ENTRE PROYECTOS			
Marque con una x al tipo de aprovechamiento de RCD realizado:			
1. Aprovechamiento al interior de la Obra			
2. Aprovechamiento de RCD en otra obra del mismo constructor			
3. Aprovechamiento de RCD en otra de obra de diferente constructor			
4. Aprovechamiento de RCD a obra pública			
INFORMACION PROYECTOS CONSTRUCTIVOS			
Información del proyecto constructivo de origen de los RCD			
Nombre Proyecto		No. Registro App WEB (PIN)	
Nombre del constructor		No. Registro App WEB (PIN)	
Información del proyecto constructivo receptora de los RCD			
Nombre del proyecto		No. Registro App WEB (PIN)	
Nombre del constructor		No. Registro App WEB (PIN)	
Si es obra pública:		No. Contrato	
Entidad que ejecuta			
Valor % del RCD a reutilizar respecto al total del material utilizado para la construcción de la obra			
INFORMACION DE LA GESTIN DE LOS RCD APROVECHADOS			
Tipo de RCD entregado		Fecha inicial de la entrega	
Peso RCD entregado (ton)		Duración de la entrega	
REGISTRO FOTOGRAFICO DEL APROVECHAMIENTO			
Descripción del proceso de aprovechamiento realizado			
Esquema o plano de la ubicación del sitio donde se reutilizará RCD, especificando el área (m2), altura (m)			
Registro fotográfico (con registro de fecha) del sitio en el cual se realizará el aprovechamiento de RCD antes de la intervención:			
Registro fotográfico (con registro de fecha) del sitio en el cual se realizará el aprovechamiento de RCD después de la intervención:			
OBSERVACIONES			
Firma y nombre del encargado proyecto constructivo de origen de los RCD			
Firma y nombre del encargado proyecto constructivo receptora de los RCD			

Identificación y control de RCD entregado a gestores, Anexo III Formato Constancia de Gestores de RCD del Decreto 0771-2018 Alcaldía de Cali

DATOS BASICOS DEL GESTOR					
Nombre o razón social		No. Registro App WEB (PIN)			
Número de identificación o NIT		Representante legal			
Número de contacto		Dirección			
Municipio		Departamento			
Gestor	Punto limpio	Aprovechamiento		Disposición final	
Tipo de RCD recibido		Peso RCD recibidos -Ton			
Tipo de aprovechamiento (Si aplica)	Entrega RCD aprovechables			Compra ecomateriales	
Tipo del ecomaterial y % de RCD contenido					
No. PIN Gestor de Transporte	Nota: Aplica para certificados al pequeño generador de RCD.				
DATOS BASICOS DEL GENERADOR DE RCD					
Nombre o razón social generador					
Número de identificación o NIT					
Nombre del proyecto constructivo				No. Registro App WEB (PIN)	
Dirección del proyecto					
Número teléfono de contacto					
Fecha recepción de los RCD					
Firma y sello del gestor de RCD					
Nit		Fecha			