



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Análisis de la Gestión de Residuos de Obras Civiles

Aplicación a una empresa constructora
uruguaya

Carmela González Rodríguez

María Celina O'Neill Maisonnave

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la
República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del
título de Ingeniero de Producción

Tutor

Pedro Piñeyro

Montevideo, Uruguay

Julio de 2024

Agradecimientos

En primer lugar, nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a Pedro Piñeyro quien fue nuestro tutor y nos acompañó a lo largo de este proceso. Su apoyo fue esencial para poder llevar adelante este proyecto, a través de su conocimiento, experiencia e interés nos guió magníficamente.

Por otro lado, queremos agradecerle a la empresa constructora CEAOSA que nos abrió sus puertas y aportó valiosa información relacionada al caso de estudio. Un especial agradecimiento a Gonzalo García y Federico Río, que nos brindaron su tiempo y estuvieron disponibles para evacuar nuestras dudas, proporcionar datos y contribuir con su experiencia ayudando a lograr los resultados de este trabajo. También a las integrantes de ReAcción, particularmente a Mariana Robano, Magalí González y Valeria Ríos, por la información brindada y por ayudarnos a comprender esta temática y conocer algunas de las posibles acciones a seguir.

Finalmente, expresar un profundo agradecimiento a nuestras familias y amigos, por todo el apoyo brindado a lo largo de esta etapa.

Resumen

La gestión de residuos de obras civiles es esencial para el desarrollo sostenible del sector de la construcción. Esta necesidad surge como respuesta a los impactos ambientales negativos causados por la creciente generación de residuos, consecuencia de un modelo lineal de construcción en el que la mayoría de los desechos son enviados a disposición final. En Uruguay, hay un creciente interés en una gestión más formal de estos residuos, respaldado por iniciativas tanto gubernamentales como del sector privado.

En este informe se presenta el trabajo realizado para abordar el problema de la gestión de residuos de obras civiles. Con este fin, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura sobre los desafíos y tendencias en la gestión de estos residuos. Posteriormente, se tomó como caso de estudio una empresa constructora uruguaya con el fin de aplicar mejoras en la gestión de residuos generados en diferentes obras. Basado en la realidad de la empresa, se desarrolló un modelo matemático con el objetivo de alcanzar una planificación de la gestión de residuos que minimice los costos asociados —costos de transporte, costos de recepción y costos de almacenamiento en obra—. Este considera distintas obras, las alternativas de disposición y valorización para cada fracción de residuos generada y las particularidades específicas del caso.

El modelo se resolvió utilizando el software CPLEX, obteniendo una solución óptima que incluye el plan de gestión de residuos para el año 2023, abarcando ocho obras activas durante ese período de planificación. Si bien la estrategia de gestión se enfoca en la minimización de costos, se lograron altos porcentajes de valorización para la mayoría de las fracciones generadas.

A partir de la solución obtenida, se realizaron análisis de sensibilidad para observar cómo varía la solución frente a posibles escenarios. Se constató que establecer metas de valorización y reducir la cantidad de basura generada contribuye a disminuir los residuos destinados a disposición final. Además, medidas como el aumento de los costos de disposición final y el incremento de la capacidad de reutilización de residuos, pueden contribuir a aumentar los porcentajes de valorización. No obstante, se destaca la necesidad de tomar acciones previas a la gestión que minimicen la generación de residuos desde el inicio.

Finalmente, se analizan posibles mejoras en el modelo para mejorar los resultados obtenidos. Entre otras, se sugiere incluir el ruteo de los fletes necesarios para gestionar los residuos, implementando una gestión de viajes que minimice sus emisiones.

Palabras clave: Gestión de Residuos de Obras Civiles, Planificación, Valorización de Residuos, Programación Matemática, Optimización.

Índice de Contenido

1. Introducción.....	1
2. Revisión de la literatura.....	3
2.1. Gestión de RCD en la etapa de diseño.....	5
2.2. Gestión de RCD en la etapa de construcción y uso.....	6
2.3. Gestión de RCD en la etapa de demolición.....	8
2.4. Gestión de RCD en varias etapas.....	9
2.5. Gestión de RCD a través del ciclo de vida.....	10
2.6. Gestión de RCD en Uruguay.....	13
3. Modelo matemático.....	15
3.1. Descripción del problema.....	15
3.2. Definición de los componentes.....	17
3.3. Formulación.....	19
3.4. Validación.....	22
3.4.1. Pruebas de validación.....	22
3.4.2. Test de carga.....	28
4. Resolución del caso de estudio.....	33
4.1. Relevamiento y generación de datos.....	33
4.1.1. Metodología.....	33
4.1.2. Datos obtenidos.....	33
4.2. Análisis de resultados del caso de estudio.....	42
5. Análisis de sensibilidad.....	53
5.1. Caso I: Capacidad de recepción de escombros en obras.....	53
5.2. Caso II: Costos de recepción.....	56
5.3. Caso III: Capacidad de almacenamiento de las obras.....	58
5.4. Caso IV: Meta de valorización.....	62
5.5. Caso V: Composición de los residuos generados.....	64
6. Conclusiones y trabajo futuro.....	70
Referencias.....	73
Apéndice I: Estado del arte	
Apéndice II: Pruebas de validación	
Apéndice III: Datos obtenidos	
Apéndice IV: Resultados obtenidos	

1. Introducción

En el presente informe se describe el trabajo realizado sobre la gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

La gestión de RCD representa un desafío global, debido al incremento en la generación de residuos de la construcción y al impacto ambiental y económico asociado. Estos residuos comprenden los materiales sólidos generados durante el proceso de construcción, mantenimiento y demolición de estructuras (Li et al., 2022). Estos materiales deben ser retirados del sitio o, idealmente, pueden ser reutilizados en el lugar de construcción para propósitos diferentes a los del proyecto original. Aunque la construcción es crucial para el desarrollo del entorno construido, conlleva impactos significativos con altas tasas de generación de residuos y prácticas informales de disposición (Lu et al., 2017). Por ende, es crucial implementar una gestión efectiva de estos residuos, con el fin de reducir el impacto asociado.

En Uruguay, la construcción es un sector clave de la economía, representando un 10% anual del PIB nacional entre 2013 y 2018 y empleando entre el 7% y 8% de las personas ocupadas (Ministerio de Ambiente, 2021). Los residuos de obras civiles representan más del 30% de los residuos que llegan al sitio de disposición final Felipe Cardoso en Montevideo. En la actualidad su gestión no es formal ni regular, lo que genera un alto impacto ambiental (Pessio, 2021).

El proyecto tuvo como primer objetivo realizar un relevamiento bibliográfico para comprender el problema en la gestión de RCD. Esto implicó realizar un estado del arte para explorar los desafíos y tendencias en la gestión de estos residuos, en donde se destaca la necesidad de abordar integralmente su gestión.

El segundo objetivo consistió en tomar un caso de estudio de una constructora local, con el fin de implementar mejoras en la gestión de los residuos generados. En base a la información relevada en el estado del arte y a las necesidades identificadas, se definió el problema a abordar.

Uno de los desafíos identificados fue la planificación de la gestión de los residuos generados en diversas obras de la constructora. Cada obra produce residuos que son clasificados en distintas fracciones. Para cada una de estas fracciones existen distintas opciones para su gestión. Pueden ser destinados a un punto de revalorización, a disposición final o en algunos casos, se pueden reutilizar en obras. Con base en esta y otra información relevada, se desarrolló un modelo matemático de programación lineal que permite planificar la gestión de esos residuos de la manera más conveniente posible.

Este último tiene en cuenta la gestión de los residuos de distintas obras y busca minimizar los costos asociados a la gestión de los mismos, en el horizonte de planificación establecido. Se consideran las distintas alternativas de envío para cada fracción de residuos y las condiciones establecidas por los puntos de recepción. Se tienen en cuenta las restricciones asociadas al transporte de las distintas fracciones, como la capacidad de los camiones. Además se tiene en cuenta las capacidades de almacenamiento de las obras y de recepción de residuos. También se fija una meta de valorización de residuos por obra, con el objetivo de reducir las cantidades enviadas a disposición final. El modelo es implementado en AMPL y resuelto con el software CPLEX, obteniéndose una solución óptima que contiene el plan de gestión de residuos para el año 2023, de ocho obras que se encuentran activas durante ese horizonte de planificación. Si bien la estrategia de gestión de residuos se enfocó en la minimización de los costos, se obtienen altos porcentajes de valorización para la mayor parte de las fracciones de residuos generados.

Se llevaron a cabo diversos casos de análisis de sensibilidad para estudiar cómo cambia la solución ante modificaciones en los valores de ciertos parámetros, y analizar así diversos escenarios. Esto incluye observar qué sucede si varían las metas de valorización fijadas para las distintas fracciones, si cambia la composición de los residuos generados, si varían los costos de los puntos de recepción, entre otros escenarios posibles.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera. En la [Sección 2](#) se presenta la revisión de la literatura. La [Sección 3](#) muestra el modelo matemático desarrollado, incluyendo la descripción del problema, su formulación, y validación. La [Sección 4](#) detalla la resolución del caso de estudio, se explica el relevamiento y generación de datos y se presenta el análisis de resultados del caso de estudio. Los análisis de sensibilidad se presentan en la [Sección 5](#). Finalmente, la [Sección 6](#) incluye las conclusiones finales y se definen sugerencias para trabajo futuro.

2. Revisión de la literatura

En esta sección se presenta un resumen del estado del arte “Desafíos y tendencias en la gestión de residuos de construcción y demolición”, que se encuentra en el [Apéndice 1](#). Para su elaboración, se analizaron más de cuarenta documentos relacionados con la temática para comprender su estado actual. Además, se empleó bibliografía específica para analizar el contexto en Uruguay.

El manejo de RCD es un desafío global, con creciente atención de la comunidad académica. Aunque hay avances, persisten desafíos en la implementación de prácticas sostenibles en todo el ciclo de vida de los residuos. Se destaca la necesidad de abordar integralmente la gestión de RCD, enfocándose en el diseño, reutilización y tecnologías avanzadas. Fortalecer regulaciones, optimizar métodos y fomentar la colaboración y cambio cultural en la industria y la sociedad son claves para una gestión más sostenible. Esto no solo beneficia al medioambiente, sino que también abre nuevas oportunidades económicas en el sector de la construcción.

La revisión de la literatura sobre la gestión de RCD tiene como fin comprender sus desafíos y tendencias actuales. Se realizó una búsqueda sistemática de trabajos publicados entre enero de 2013 y mayo de 2023 en plataformas como Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore y Springer Link. El término utilizado para la búsqueda fue: “optimization AND "construction waste management" AND NOT fuzzy AND NOT stochastic AND NOT uncertainty "optimization AND construction waste management”.

Se identificaron inicialmente 224 documentos, de los cuales se excluyeron cinco duplicados. Se aplicaron filtros adicionales basados en el título y el resumen para eliminar documentos que no se centran en RCD o que abordan otros temas. También, se descartaron aquellos relacionados con la certificación verde de edificaciones, la utilización de materiales reciclados, la sostenibilidad y construcción verde, así como aquellos a los que no se pudo acceder. Estos criterios de exclusión se detallan en el estado del arte. Después de aplicarlos, se obtuvo una base final de 41 documentos para el análisis. Estos documentos fueron examinados en profundidad y clasificados en diferentes categorías que reflejan las diversas etapas de la gestión de RCD: diseño, construcción y uso, demolición, así como una categoría para aquellos que abordan todo el ciclo de vida de los residuos.

En la fase de diseño se planifica y diseña el proyecto, incluyendo la selección de materiales y la elaboración de planos arquitectónicos y de ingeniería. En la fase de construcción se lleva a cabo la construcción física del proyecto, siguiendo los planos y especificaciones previamente diseñados, e instalando estructuras y sistemas. En la fase de uso u operación el edificio entra en funcionamiento y se utiliza para su propósito previsto, con tareas de mantenimiento y gestión para garantizar su correcto funcionamiento. En la fase de demolición o deconstrucción, al final de su vida útil, el

edificio se demuele y se prepara el terreno para futuros proyectos o usos. Estas fases representan los principales hitos de planificación, ejecución, uso y eventual cierre de una edificación (Sharma et al., 2022).

Se identificaron varios conceptos recurrentes y relevantes para abordar la gestión de RCD durante el ciclo de vida de una edificación. Dentro de estos se destacan la *herramienta de modelado BIM* (Building Information Modeling), seguidas por las palabras *vertedero*, *reciclar*, *reutilizar* y *reducir*, que reflejan la jerarquía de las 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar). Aunque el concepto de minimización también fue recurrente, su uso se centró principalmente en la minimización de residuos, sin vincularse con modelos matemáticos.

Resulta importante definir en primer lugar el concepto de RCD. Los residuos de construcción, provenientes de actividades de construcción, renovación y reparación, y los residuos de demolición, resultantes de la demolición de estructuras, se distinguen entre sí (Kabirifar et al., 2020). Mientras que los primeros pueden abarcar una amplia gama de materiales generados durante varias etapas del proceso, los de demolición consisten principalmente en escombros (Ge et al., 2017). Estos desechos se conocen colectivamente como RCD y se originan debido a diversos factores, como la falta de conformidad con las especificaciones y el uso inadecuado de recursos (Kabirifar et al., 2020; Li et al., 2022).

Dentro de los conceptos más reiterados en los documentos se encuentra el término *vertedero*, que representa una de las opciones más utilizadas para la disposición final de los RCD. La disposición final de residuos debería ser la última opción para su eliminación. Muchos de estos residuos son reutilizables o reciclables, por lo que el enterramiento en vertederos o en el océano representa una seria amenaza ambiental (Yeheyis et al., 2013). Por ello, la disposición final debe considerarse solo para los residuos que no puedan ser reutilizados o reciclados, priorizando estas últimas opciones (Won y Cheng, 2017).

En esta línea, otro de los términos más frecuentes son *reciclar*, *reutilizar* y *reducir*, que conforman la jerarquía de las 3R y se vinculan con la economía circular (EC). La EC busca minimizar los impactos ambientales gestionando eficientemente los recursos y promoviendo su permanencia en la economía (Reacción, 2021). Contrario al modelo lineal, la EC prioriza el uso eficiente de recursos y prolonga su vida útil mediante la circulación, reduciendo así su salida del ciclo (Sharma et al., 2022). Este modelo propone un cambio de paradigma en diseño, fabricación y uso, minimizando los desperdicios y la energía (Reacción, 2021).

La jerarquía 3R es fundamental para la EC, busca minimizar los residuos y sustituir el concepto de *fin de vida útil* (Sharma et al., 2022). Reducir implica prevenir o disminuir el consumo de recursos y generación de residuos desde la fuente (Yeheyis et al., 2013).

Reutilizar permite utilizar los residuos generados más de una vez sin comprometer su integridad, mientras que reciclar implica procesar estos residuos para fabricar nuevos productos (Sharma et al., 2022).

Por último, resulta pertinente definir el término BIM. Es una tecnología clave en ingeniería y arquitectura, proporcionando una representación digital detallada de las instalaciones. Este modelo se utiliza para gestionar y minimizar los RCD. BIM permite la revisión de diseño, coordinación en 3D, cálculo de cantidades y planificación de fases, entre otros usos (Won y Cheng, 2017). Además, ofrece diversas dimensiones como la 4D para programación y la 5D para estimación de costos, lo que lo hace adaptable a diferentes etapas del proyecto (Guerra et al., 2020). Asimismo, facilita una estimación eficiente y confiable de los RCD (Wang et al., 2021), mejorando la colaboración multidisciplinaria y la toma de decisiones en proyectos de construcción (Akinade et al., 2018).

Los RCD constituyen una proporción considerable de los desechos sólidos a nivel mundial y contribuyen a la degradación ambiental (Lu et al, 2017). Se generan en grandes cantidades en diferentes países, con porcentajes variables respecto al total de desechos generados. Una parte considerable de los RCD se destina a vertederos sin tratamiento adicional (Guerra et al., 2020), lo que destaca la necesidad urgente de una mejor gestión y procesamiento (Lu et al., 2022).

A continuación se presenta un resumen del análisis realizado para cada una de las categorías definidas para organizar la literatura relevada. Se detalla el problema de la gestión de RCD, cómo se ha abordado y los resultados obtenidos en diferentes etapas del ciclo de vida de las edificaciones.

2.1. Gestión de RCD en la etapa de diseño

La gestión eficiente de RCD comienza en la etapa de diseño, donde las decisiones inapropiadas pueden aumentar el volumen de residuos. Estudios como el de Won y Cheng (2017) destacan que el diseño deficiente y los cambios inesperados son causas significativas de generación de RCD. Un tercio de los residuos podrían reducirse mediante esfuerzos de minimización en esta etapa (Ajayi et al., 2017), por lo que el trabajo de los diseñadores es fundamental (Lu et al., 2017).

BIM emerge como una herramienta crucial en la gestión de RCD en la fase de diseño. Won y Cheng (2017) identifican usos de BIM que pueden prevenir causas principales de generación de residuos, como la planificación de fases y detección de conflictos. Además, proponen procesos basados en esta herramienta para una gestión eficiente de RCD, incluyendo revisión de diseño y medición de cantidades.

El BIM computacional propuesto por Lu et al. (2017), se vislumbra como un entorno para calcular niveles de generación de residuos, aunque sus algoritmos pueden presentar limitaciones en reflejar completamente su naturaleza. Por otro lado, modelos de dinámica de sistemas, como el propuesto por Wang et al. (2015), muestran que el uso de componentes prefabricados o modificaciones y estrategias de diseño, tienen un impacto significativo en la reducción de residuos.

Las pautas para la minimización de residuos en el diseño propuestas por Laovisutthichai et al. (2020), sugieren acciones específicas en cada hito de la etapa, desde la preparación hasta el diseño técnico. Estas acciones incluyen métodos de construcción alternativos, como diseño modular, fomentar la colaboración entre las partes interesadas, reutilizar materiales, incluir procedimientos y soluciones para minimizar residuos. Estas pautas se validaron en un caso real, demostrando su eficacia en la reducción y simplificación de procesos de construcción.

Finalmente, medidas de adquisición de materiales y logística también juegan un papel crucial en la gestión de RCD. En esta línea, Ajayi et al. (2017), identifican estrategias clave como la eficiencia en la gestión de compra y la entrega de materiales, esquemas de devolución, uso de embalajes mínimos, entre otras.

En conjunto, estos estudios subrayan la importancia de abordar la generación de residuos desde la fase de diseño. Se integran prácticas como el uso de BIM, estrategias de adquisición y diseño eficientes y consideraciones ambientales para todo el proceso de construcción.

2.2. Gestión de RCD en la etapa de construcción y uso

Dada la enorme cantidad de residuos generados por la construcción, es esencial implementar estrategias de minimización durante todo el proceso constructivo para reducir su impacto. Según Tafesse et al. (2022), cuando estas se aplican de manera efectiva, los beneficios económicos, medioambientales y sociales son significativos, lo que resalta la importancia de incorporar iniciativas para reducir los residuos en sitio durante la fase de construcción.

Desde la óptica de la ingeniería ecoindustrial, Zhou et al. (2014) proponen medidas como minimizar cambios en los planes de construcción, clasificar adecuadamente los residuos, reutilizarlos en obra y centrarse en la producción de agregados reciclados para reducir la cantidad de residuos generados.

La tecnología de visión por computadora, como las redes neuronales, se está utilizando cada vez más para la gestión eficiente de residuos en la construcción. Wang et al. (2019b) describen cómo los robots equipados con redes neuronales pueden identificar y reciclar materiales pequeños dispersos en el lugar de trabajo, lo que ayuda a mejorar la

eficiencia y reducir los costos asociados con la gestión de residuos. Del mismo modo, Davis et al. (2021) demuestran cómo las técnicas de aprendizaje automático pueden clasificar residuos basados en imágenes digitales. Esto mejora la precisión y reduce los costos en comparación con los métodos tradicionales de clasificación manual.

La integración de tecnologías como BIM y *blockchain* también ofrece soluciones innovadoras (Liu et al., 2022). Estos sistemas permiten el registro transparente y la validación de información relacionada con los materiales y residuos a lo largo del ciclo de vida del proyecto, lo que mejora la trazabilidad y la eficiencia en la gestión de residuos.

A su vez, el uso de tecnologías como 4D-BIM facilita la planificación de la gestión, permitiendo la visualización y estimación de la reutilización y reciclaje de materiales (Guerra et al., 2020). Esto contribuye a una planificación más efectiva y a la reducción de residuos en sitio, lo que a su vez ayuda a minimizar los costos y los impactos ambientales asociados.

En Egipto, Daoud et al. (2021) cuantificaron los RCD en diversos proyectos de construcción y exploraron factores que influyen en su generación. Se encontró que la madera, la arena y los ladrillos son los materiales más desperdiciados. Además, los proyectos de infraestructura generan la mayor cantidad de RCD y los mayores costos asociados. Lu et al. (2022) desarrollaron un método de reconocimiento de composición de RCD. Esto ofrece una herramienta poderosa de visión por computadora para evaluar la composición de vertederos y guiar la automatización de la segregación de materiales en los RCD.

Por otro lado, en Hong Kong, Yuan et al. (2013) también destacan la importancia de la segregación de los RCD, especialmente porque estos suelen ser una mezcla de materiales inertes y no inertes. Las regulaciones implementadas para la gestión de RCD han mejorado significativamente la segregación en el lugar de construcción.

Bao y Lu (2021) proponen un marco para la toma de decisiones y la planificación del reciclaje de RCD en China, donde se generan grandes cantidades de RCD. El gobierno ha implementado regulaciones pioneras y exitosas para la gestión, incluyendo el cierre de vertederos y sistemas de cuotas y colaboración entre empresas de demolición y reciclaje.

Finalmente, Tafesse et al. (2022) destacan los impactos ambientales y socioeconómicos de los RCD en Etiopía. El sobre costo de los proyectos de construcción y la contaminación ambiental ocasionados por los residuos en sitio son los impactos más relevantes. A pesar de los desafíos, más empresas están llevando un registro de la cantidad de RCD generados, lo que muestra avances en su gestión. Los autores

proponen varias medidas como la implementación de buenas prácticas de gestión en sitio, la reutilización y el reciclaje de materiales sobrantes en el lugar, entre otros.

En resumen, la gestión efectiva de los RCD en la etapa de construcción requiere una combinación de tecnologías avanzadas, regulaciones sólidas, prácticas de clasificación in situ y enfoques integrales que aborden tanto los aspectos ambientales como socioeconómicos del problema.

2.3. Gestión de RCD en la etapa de demolición

La etapa de demolición o deconstrucción implica dismantelar cuidadosamente una edificación para recuperar materiales valiosos. Los residuos de demolición comprenden escombros, que pueden contener materiales peligrosos, aislamientos, cableado eléctrico, entre otros (Ge et al., 2017). Es crucial evaluar la composición, características y ubicación de estos residuos para una gestión eficiente (Chen et al., 2021).

La falta de visualización del ciclo de vida del proceso, la comunicación deficiente entre partes interesadas, la escasez de medidas de reciclaje y la mala planificación de recursos son problemas comunes en la gestión de residuos de demolición (Kang et al., 2022). Contar con una visión integral del proceso es crucial debido a su naturaleza dinámica (Kang et al., 2022). Además, reciclar y reutilizar materiales de demolición es un desafío debido a la contaminación cruzada, barreras tecnológicas y costos involucrados (Ge et al., 2017).

La aplicación BIM en esta etapa ha demostrado ser prometedora, permitiendo una identificación precisa de materiales, desarrollo de modelos 3D reconstruidos de la edificación y sistemas de gestión de residuos (Ge et al., 2017). En particular el sistema desarrollado por Ge et al. (2017) busca mejorar la eficiencia de la demolición, el reciclaje efectivo y el ahorro de costos. El BIM construido se efectúa para identificar y medir materiales reciclables y desarrollar un plan para el proceso de reciclaje. Este modelo se utiliza como insumo para el sistema de gestión de residuos.

Kang et al. (2022) proponen un marco conceptual para la demolición inteligente que maximiza la reutilización y reciclaje, integrando tecnologías digitales como BIM, Internet of Things (IoT) e Inteligencia Artificial (IA). Desarrollaron servicios para escaneo y levantamiento topográfico de residuos, así como para demolición y transporte de los RCD resultantes, evidenciando ahorros económicos.

BIM también fue utilizado por Wang et al. (2021) quienes desarrollaron un sistema de toma de decisiones para optimizar planes de transporte y demolición, ofreciendo costos óptimos y facilitando decisiones informadas a los propietarios. Este se probó en la demolición de un edificio en China, mejorando la eficiencia y precisión de la gestión de residuos, evitando acumulaciones en sitio.

Chen et al. (2021) propusieron un modelo de evaluación automatizada de la composición de residuos utilizando redes neuronales convolucionales. Esta metodología busca automatizar y mejorar la medición de la composición de residuos, reduciendo costos y aumentando la eficiencia.

Bi et al. (2022) abordaron la ineficiencia en la gestión de residuos desde una perspectiva logística, adaptando el problema del vendedor viajero (TSP) para optimizar la secuencia de pedidos de recolección de residuos. Propusieron una matriz de distancias de pedido a pedido para abordar las particularidades de la recolección. Además, desarrollaron un modelo para medir emisiones de carbono en viajes, demostrando mejoras significativas en la eficiencia del proceso de disposición.

En resumen, estos estudios destacan la importancia de una gestión integral, coordinada y eficiente de los residuos de demolición. Se deben aprovechar tecnologías como BIM y enfoques innovadores para maximizar la reutilización y reciclaje de materiales. Además, es preciso alinear el plan de demolición y el de transporte para optimizar la secuencia y carga de los vehículos, optimizando así los costos y beneficios económicos.

2.4. Gestión de RCD en varias etapas

La minimización de los RCD no solo depende de las etapas de construcción y demolición, sino también de acciones tomadas incluso mucho antes del inicio de una obra. La gestión de RCD en múltiples fases de la construcción puede ser abordada y estudiada desde diversas perspectivas (Ghaffar et al., 2019).

Janani et al. (2022) enfocan su investigación en India, donde encontraron que la falta de regulaciones para minimizar los residuos, cambios en el diseño, deficiencias en la adquisición y control de materiales y falta de planes logísticos, contribuyen a la generación de RCD. Recomiendan buenas prácticas tanto en la etapa de diseño como de ejecución para reducirlos, como realizar estudios detallados del sitio, evaluar impacto ambiental de los proyectos, llevar registro de los residuos y establecer un seguimiento estructurado durante la construcción.

Doussoulin y Bittencourt (2021) comparan escenarios de gestión de RCD entre Francia y Brasil, destacando las diferencias en enfoques y resultados en las etapas de diseño y construcción. Mientras Francia ha logrado reducir significativamente la cantidad de residuos mediante políticas, fabricación fuera del sitio y prácticas de reciclaje, Brasil enfrenta desafíos debido al crecimiento urbano, errores en diseño o ejecución y la falta de regulaciones efectivas. Los autores sugieren la colaboración internacional para fomentar la innovación en este campo.

Por otro lado, Marzouk y Azab (2013) realizan un estudio empírico sobre la gestión de RCD en Egipto, evaluando los impactos del reciclaje frente a la eliminación. Destacan

que la falta de un marco coherente para la gestión de estos residuos contribuye a su disposición, tanto legal como ilegal, causando daños ambientales, sociales y económicos. Recomiendan establecer centros de reciclaje, implementar programas de incentivos, activar regulaciones estrictas y desarrollar un sistema integral de gestión de RCD, con multas por incumplimiento.

Button et al. (2014) estudian estrategias para desviar RCD en Waterloo, estableciendo tasas de desvío optimizadas para distintas categorías de residuos, con el fin de reducir costos y cumplir con objetivos de reciclaje. Los autores proponen que, en lugar de imponer un desvío del 60% en todos los flujos de residuos, se reduzca el costo del reciclaje aumentando las tasas de desvío para los flujos más económicos de reciclar.

Para mejorar la gestión de RCD en Hong Kong, Chen et al. (2016) proponen una plataforma de big data, destacando su potencial para proporcionar información valiosa y promover mejoras sostenibles en la gestión de residuos.

La gestión actual de RCD y la conciencia sobre la construcción circular son temas relevantes a nivel global. Ghaffar et al. (2020) investigan las prácticas y conciencia sobre la construcción circular en el Reino Unido. Subrayan la necesidad de cambiar la mentalidad de la industria hacia una producción más limpia de materiales, promoviendo una mayor conciencia sobre la reutilización y el reciclaje e introduciendo leyes con el fin de aumentar las tasas.

En este contexto, Li et al. (2022) analizan la literatura sobre gestión de RCD, destacando la importancia de temas como la cuantificación de residuos y el principio de las 3R. Identifican áreas de investigación poco exploradas, como estrategias de reducción y reutilización, participación de partes interesadas, análisis del ciclo de vida (LCA) de los proyectos y estudio de tipos específicos de RCD. La revisión muestra un crecimiento en publicaciones, indicando un aumento en la conciencia sobre la gestión de estos.

En conjunto, estos estudios resaltan la importancia de implementar políticas y prácticas efectivas de gestión de RCD en todas las etapas del proceso. La implementación de regulaciones integrales podría aumentar las tasas de reciclaje y reducir la presencia de vertederos ilegales, lo que tendría un impacto positivo ambiental.

2.5. Gestión de RCD a través del ciclo de vida

El LCA evalúa los impactos ambientales de un producto o actividad considerando su ciclo completo, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de residuos.

Yeheyis et al. (2013) proponen un marco de gestión de RCD que maximiza las 3R. También desarrollan un índice de sostenibilidad que guía decisiones sobre selección de

materiales, reciclaje, reutilización y disposición final. Este enfoque integral reduce los desperdicios de materiales en tres fases: preconstrucción, construcción y renovación, y demolición.

La EC en la construcción busca satisfacer las necesidades humanas sin causar impactos ambientales negativos, a diferencia del enfoque lineal convencional. En esta línea, Sharma et al. (2022) identifican estrategias clave para la gestión de RCD, adoptando una perspectiva de EC. Estas incluyen la estandarización de componentes, diseño adaptable, preferencia por materiales sostenibles, mejora del mercado de materiales reciclados, responsabilidad extendida del productor y aplicación de subsidios y penalizaciones.

Para explorar el tema del reciclaje y reutilización de RCD, Sepasgozar et al. (2021) realizaron un estudio exhaustivo, evaluando artículos y colaboraciones académicas de Australia, Canadá, Reino Unido y EEUU. Además, recopilaron palabras clave de Twitter para explorar las tendencias de investigación y los intereses de la industria. Descubrieron que prácticamente la mitad de las publicaciones se centran en residuos de concreto, dejando a otros materiales menos atendidos. Se observó la necesidad de sistemas de información, aunque no se profundizó en cómo la integración de estos podría contribuir a la gestión de RCD.

Kucukvar et al. (2016) proponen un modelo matemático de optimización multicriterio de LCA para evaluar estrategias de gestión de RCD. Desarrollaron un modelo híbrido para evaluar los impactos ambientales de diversas opciones de tratamiento de los RCD, incluyendo reciclaje, vertederos e incineración. Luego, emplearon un modelo para determinar la mejor estrategia de reciclaje con el fin de maximizar el valor económico y ambiental. Este fue probado para un edificio universitario en EEUU, sugiriendo el reciclaje del 100% de metales ferrosos y no ferrosos, cartón, plástico y vidrio para maximizar ahorros ambientales y económicos.

En China Wang et al. (2019a) proponen un método para optimizar la tarifa de gestión de RCD, considerando los impactos ambientales y la disposición de la sociedad. El proceso incluye definir el alcance y los límites, analizar el inventario, evaluar los impactos y determinar la tarifa mediante un modelo de disposición a pagar. En función de esto, sugieren tarifas específicas por tonelada para diferentes tipos de residuos.

Esguícero et al. (2021) proponen un marco referencial en Brasil para modelar la gestión de RCD considerando su ciclo de vida. Este marco identifica seis procesos clave: generación de residuos, recolección/transporte, inspección, reciclaje, reutilización y disposición final, y evalúa tanto el estado actual como el deseado. La herramienta busca identificar deficiencias y oportunidades de mejora, con el objetivo de aumentar la productividad, promover tasas más altas de reciclaje y mejorar la calidad de los productos reciclados, aspectos importantes para integrar la gestión de RCD, LCA y la EC.

En cuanto a la reutilización de los materiales, Gan y Cheng (2015) investigan la viabilidad de utilizar material de excavación como relleno en proyectos de construcción. Presentan dos modelos, uno de optimización centralizada (COM) y otro basado en agentes distribuidos (ABM), para analizar una cadena de suministro que abarca sitios de construcción, vertederos y fuentes comerciales. Mientras que el COM busca maximizar la exportación de relleno minimizando los costos de transporte, el ABM permite que los participantes tomen decisiones basadas en sus propios objetivos y luego compartan los resultados para llegar a un acuerdo sobre el envío de relleno. Comparando el desempeño entre ambos modelos, se concluye que el ABM es más adecuado para cadenas de suministro dinámicas, aunque puede presentar cierta pérdida de optimalidad debido a la falta de información global.

Si bien existe un número limitado de enfoques basados en el LCA para tratar la prevención de residuos, Bizcocho y Llatas (2019) adaptan la metodología LCA y desarrollan dos modelos para integrar la prevención en la gestión de RCD, uno general y otro centrado en residuos de hormigón. Al aplicarlos a edificios en España, encuentran que la prevención es el enfoque más favorable, reduciendo la cantidad de residuos y disminuyendo los impactos ambientales en todas las categorías evaluadas. Destacan la importancia de integrar plataformas con BIM para facilitar la implementación de la metodología LCA en la gestión y análisis de datos.

Por otro lado, Yu et al. (2022) evaluaron las políticas de gestión de RCD en distintas ciudades de China, entre 2007 y 2018. Encontraron que las políticas carecen de enfoque a largo plazo y solo ofrecen beneficios temporales, lo que no impacta en la reducción sostenible de RCD. Proponen una colaboración más amplia entre departamentos gubernamentales, mayor transparencia en los datos de RCD y establecimiento de plataformas de monitoreo web para mejorar la efectividad de la gestión.

Las tecnologías de la información en la gestión de RCD están en desarrollo y prometen mejorar el LCA de las edificaciones y los RCD, reduciendo impactos ambientales. Un estudio de Li et al. (2020) analiza investigaciones entre 2000 y 2019, abordando tópicos como *generación, reducción, transporte, reciclaje y disposición de RCD*. Identificaron categorías de tecnologías avanzadas, como BIM, *big data* y *análisis de imágenes*, destacando su potencial y posibles aplicaciones en la gestión de RCD.

Por otro lado, Kabirifar et al. (2020) identificaron cinco brechas clave en la gestión de RCD a abordar: disparidad entre países desarrollados y en desarrollo, falta de evaluación exhaustiva de la efectividad en la gestión, necesidad de estudiar la influencia de las actitudes de las partes interesadas, atención insuficiente a nuevas herramientas y tecnologías, y la importancia de considerar la jerarquía de gestión que abarca las 3R. Recomiendan investigar el impacto de cada nivel de esta jerarquía en la eficacia de la gestión de RCD.

Aslam et al. (2020) examinan la gestión de RCD en Estados Unidos y China, planteando preguntas cruciales sobre políticas, enfoques de mercado, desafíos y contribuciones a la EC. Proponen fortalecer la legislación y la conciencia pública, así como la supervisión gubernamental respaldada por incentivos económicos.

En resumen, el LCA y la EC están ganando importancia en la gestión de RCD debido al aumento de la actividad, promoviendo la sostenibilidad y reduciendo los impactos ambientales. Se destaca la aplicación de la jerarquía 3R para reducir la disposición final. Se observa una variedad de enfoques en el análisis, algunos centrados en el ciclo de vida de las edificaciones y otros en el de los residuos, ambos buscando un análisis integral del proceso. Sin embargo, aún hay brechas en la investigación y la implementación que requieren atención.

2.6. Gestión de RCD en Uruguay

El sector de la construcción en Uruguay es de suma importancia para la economía, representando el 10% del PIB anual entre 2013 y 2018. Sin embargo, el aumento en la actividad de construcción ha generado más RCD, con Montevideo como la principal ciudad contribuyente. Aunque existe una empresa de valorización de RCD desde 2018, su capacidad es limitada (Ministerio de Ambiente, 2021). Actualmente la mayoría de estos residuos se disponen de manera informal o como relleno sanitario en la Usina Felipe Cardoso, representando aproximadamente el 30% de los residuos que llegan al sitio (Pessio, 2021) (Roda y Pigola, 2021).

Existen acuerdos entre la Intendencia de Montevideo, el Ministerio de Ambiente y la Cámara de la Construcción para mejorar la gestión de los RCD, apuntando hacia un Uruguay más circular, pero persisten debilidades como la disposición informal y la falta de regulaciones específicas (Pessio, 2021). Además, se identifican carencias de infraestructura para la valorización de residuos y falta de clasificación de los RCD (MA, 2021). Tampoco se tiene incorporado el reciclaje como una forma de gestionar los residuos –solo el 1% de los RCD generados llegan a plantas de reciclaje– (ReAcción, 2021). Se necesita un esfuerzo continuo para aumentar la valorización y formalizar la disposición de los RCD en Uruguay.

* * *

La revisión exhaustiva de la literatura sobre la gestión de RCD destaca los desafíos y tendencias globales en este campo. Se abordaron aspectos clave de este problema, considerando el ciclo de vida de los residuos y el impacto ambiental y socioeconómico de su gestión. Se observa un aumento en la investigación de esta área, posiblemente impulsado por regulaciones más estrictas y una mayor conciencia ambiental.

Se identifican prácticas específicas en cada etapa del proceso de construcción, desde el diseño hasta la demolición, con énfasis en la reducción de la generación de residuos, la gestión in situ y la coordinación efectiva. Se evidencia una falta de enfoque integral en la gestión de RCD y se destaca el potencial de BIM como una herramienta valiosa, aunque subutilizada. Se reconoce que, si bien hay una inclinación hacia abordar el problema desde su origen, en la actualidad las prácticas se centran en el manejo de los residuos que ya han sido generados. Resulta necesario apuntar a su minimización, aumentando la valorización, con el fin de evolucionar desde un modelo de construcción lineal hacia uno más circular.

En la etapa de diseño, se subraya la importancia de la planificación de materiales, estandarización, diseño modular y la participación temprana de las partes interesadas para reducir la generación. Durante la construcción, se enfatiza en la gestión in situ de los residuos mediante tecnologías avanzadas, reduciendo costos y aumentando la tasa de reciclaje y reutilización. La etapa de demolición enfrenta desafíos en la coordinación de la gestión de RCD. Se sugiere la elaboración de planes integrales de demolición apuntando a una coordinación efectiva de todas las partes involucradas. El LCA y la jerarquía 3R se presentan como enfoques clave para minimizar la disposición final. Implementar regulaciones contemplando todas las fases del ciclo de construcción, reduciría la disposición en vertederos y minimizaría el impacto ambiental.

En el contexto uruguayo, se observa un incipiente abordaje de este problema, con avances normativos, pero con desafíos en la implementación y supervisión. Se propone el uso del LCA y la promoción de una cultura de la circularidad para mejorar la gestión de RCD. Se subraya la importancia de la conciencia y colaboración de todos los actores involucrados para avanzar hacia prácticas más sostenibles.

Se visualiza un futuro prometedor que requiere la integración de tecnologías avanzadas, modelos de optimización, la colaboración entre sectores, el fortalecimiento de regulaciones y la promoción de acuerdos colaborativos. Esto no solo beneficiará al medioambiente, sino también generará oportunidades económicas y sociales en el sector de la construcción.

3. Modelo matemático

En la presente sección se describe el modelo matemático desarrollado en este proyecto. En primer lugar se presenta una descripción del problema identificado junto a la empresa. Luego se definen los componentes del modelo y se presenta su formulación. Por último, se presenta la validación del modelo propuesto, presentando tanto las pruebas de validación como los resultados obtenidos en el test de carga.

3.1. Descripción del problema

La gestión eficiente de residuos en el sector de la construcción se ha vuelto crucial para las empresas que buscan optimizar costos y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

En relación a esta temática, la empresa CEAOSA está implementando los primeros pasos en la gestión de residuos en algunas de sus obras. Actualmente los residuos se disponen por obra, una vez que se alcanza la capacidad del camión tercerizado. Esto implica la acumulación de residuos generados en sitio, ocupando espacio y entorpeciendo otras tareas. El desafío está en coordinar la gestión de residuos en las distintas obras en ejecución.

Para esto, se desarrolla un modelo matemático que debe contemplar obras, puntos de recepción de residuos, tipos de residuos generados y otros factores relevantes. El objetivo principal es lograr una planificación coordinada de la gestión de residuos. Se busca reducir los costos operativos y alcanzar altos porcentajes de valorización de los residuos mediante prácticas sostenibles como la reutilización, que implica utilizar los RCD generados en otras obras sin comprometer su integridad, o el reciclaje, que requiere el procesamiento de estos para fabricar nuevos productos. A continuación se presenta una descripción detallada del problema.

Se tiene una cantidad finita de obras y distintas fracciones de residuos que se generan en esas obras en el correr del tiempo. Las *fracciones de residuos* se refieren a los distintos tipos de residuos generados, por ejemplo plástico, escombros, madera, entre otros. La cantidad de residuos generados en cada obra en un período específico es conocida. Allí, estos se acumulan en bolsones, donde se clasifican por fracción.

Existen distintos puntos de disposición final y de revalorización a los que se pueden trasladar los residuos. Cada uno de estos puntos aplica una tarifa por recibirlos. Algunos tienen una capacidad mínima de recepción.

En ocasiones ciertos residuos como el escombros, pueden ser trasladados de una obra en ejecución a otra, donde se les seguirá dando uso. En este caso no se aplica una tarifa por la disposición, únicamente se incurre en el costo de traslado.

Los residuos se trasladan en camiones hacia los distintos destinos. Cada camión tiene una capacidad conocida, y cada viaje un costo asociado, que en algunos casos puede ser nulo. Esto ocurre cuando la cantidad enviada es mayor o igual a una cantidad estipulada por el punto de revalorización. Se asume que un camión transporta una única fracción de residuos a la vez, y existe una cantidad máxima de viajes por período para cada camión.

El objetivo es obtener una planificación que determine, para un período dado, la cantidad de fracciones de residuos que deben ser recolectadas en las distintas obras y enviadas a puntos de destino posibles. Esta planificación busca minimizar la suma de los costos de transporte, los costos establecidos por los puntos de recepción y el costo de almacenamiento en obra. Además, se espera que los puntos seleccionados sean puntos de revalorización u otras obras, ya que cada una tiene estipulada una meta de valorización. Esta meta se define para cada obra como el mínimo de residuos generados que deben ser revalorizados o reutilizados. Al finalizar cada período, no se permite exceder una cantidad determinada de residuos sin recolectar, es decir, acumulados en cada obra.

Para llevar a cabo el modelo, se realizaron algunas simplificaciones de la realidad y se tomaron como ciertos algunos supuestos en la definición del problema.

En primer lugar, no se consideran las distintas etapas del proceso de construcción, ya que el enfoque del modelo está centrado en períodos de corta duración, en los que las etapas permanecen relativamente constantes y su variación no resulta crucial en la resolución. Por otro lado, no se consideraron las distancias entre las obras, los puntos de revalorización y disposición final. Esto se debe a que el análisis no se centra en el ruteo de los residuos sino en su traslado de un punto a otro. Tampoco se tomaron en cuenta ventanas horarias para el traslado de residuos ni días de trabajo para su gestión.

Se asumió que la mezcla de residuos es equivalente a la fracción de residuos denominada *basura*, para simplificar el tratamiento de los datos y la disposición para estos casos. La mezcla de fracciones clasificadas en un mismo viaje tiene una incidencia mínima en la realidad, razón por la que se decidió no considerarla.

Por otro lado, no se consideró el uso de volquetas para gestionar los residuos, ya que su uso es mínimo porque se considera que incentiva la mezcla de residuos, desestimulando su clasificación. Asimismo, se asumió que no existen restricciones en cuanto a la cantidad de bolsones utilizados, únicamente se restringe la cantidad total de residuos acumulados en obra. Finalmente, los costos asociados a la gestión interna de los residuos no se tuvieron en cuenta para el modelo, por ejemplo, horas persona para ordenarlos, clasificarlos, entre otros.

3.2. Definición de los componentes

A continuación se definen los componentes que constituyen el modelo de Programación Matemática. En primer lugar se presentan los conjuntos, luego los parámetros y finalmente las variables de decisión.

Conjuntos

- O : Conjunto de obras.
- F : Conjunto de fracciones de residuos.
- PD : Conjunto de puntos de disposición final.
- PR : Conjunto de puntos de revalorización.
- C : Conjunto de camiones.

Parámetros

- T : Cantidad de períodos.
- qf_{ijt} : Cantidad de residuos generados de la fracción j en la obra i en el período t .
- cd_{jh} : Tarifa del punto de disposición final h por unidad de fracción j .
- cr_{jl} : Tarifa del punto de revalorización l por unidad de fracción j .
- cb_{jit} : Costo de almacenar la fracción j en la obra i en el período t .
- qd_{jh} : Cantidad mínima de recepción del punto de disposición final h por unidad de fracción j .
- qr_{jl} : Cantidad mínima de recepción del punto de revalorización l para la fracción j .
- kc_{jw} : Capacidad en kilogramos del camión w para la fracción j .
- cvd_{wih} : Costo de un viaje del camión w desde la obra i hasta el punto de disposición final h .
- cvr_{wil} : Costo de un viaje del camión w desde la obra i hasta el punto de revalorización l .
- $cvo_{wii'}$: Costo de un viaje del camión w desde la obra i hasta la obra i' .

- qe_{jwil} : Cantidad en kilogramos mínima exigida de residuos de la fracción j para que el costo del viaje del camión w desde la obra i hasta el punto de revalorización l sea nulo.
- qv_{wt} : Cantidad máxima de viajes posibles del camión w en el período t .
- qm_{jit} : Cantidad en kilogramos máxima de residuos de la fracción j sin recolectar en la obra i al finalizar el período t .
- B_{ij} : Inventario inicial de residuos de la fracción j en la obra i .
- M : Valor numérico grande para la activación de las variables binarias $yp1_{ijltw}$ e $yp2_{ijltw}$.
- NPR_{jl} : Valor numérico grande para la activación de la variable binaria yr_{ijltw} .
- NPD_{jh} : Valor numérico grande para la activación de la variable binaria yd_{ijhtw} .
- $NO_{ji'}$: Valor numérico para la activación de la variable binaria $yo_{iji'tw}$.
- G_{ij} : Meta de valorización de la fracción j para la obra i expresada como un porcentaje de la cantidad generada.

Variables de decisión

- xd_{ijhtw} : Cantidad en kilogramos de la fracción de residuos j recolectada en la obra i y enviada al punto de disposición final h en el período t por el camión w .
- xr_{ijltw} : Cantidad en kilogramos de la fracción de residuos j recolectada en la obra i y enviada al punto de revalorización l en el período t por el camión w .
- $xo_{iji'tw}$: Cantidad en kilogramos de la fracción de residuos j recolectada en la obra i y enviada a la obra i' en el período t por el camión w .
- xb_{ijt} : Cantidad en kilogramos de la fracción de residuos j que permanece en la obra i al finalizar el período t .
- yd_{ijhtw} : Variable binaria que vale 1 si se traslada una cantidad positiva de la fracción j desde la obra i al punto de disposición final h en el período t por el camión w ; 0 en caso contrario.
- yr_{ijltw} : Variable binaria que vale 1 si se traslada una cantidad positiva de la fracción j desde la obra i al punto de revalorización l en el período t por el camión w ; 0 en caso contrario.

- $yo_{iji'tw}$: Variable binaria que vale 1 si se traslada una cantidad positiva de la fracción j desde la obra i a la obra i' en el período t por el camión w ; 0 en caso contrario.
- $yp1_{ijltw}$: Variable binaria que vale 1 si la cantidad de fracción j que se traslada por el camión w desde la obra i al punto de revalorización l en el período t es mayor o igual a la cantidad mínima exigida por ese punto; 0 en caso contrario.
- $yp2_{ijltw}$: Variable binaria complementaria a $yp1_{ijltw}$ que vale 1 si la cantidad de fracción j que se traslada por el camión w desde la obra i al punto de revalorización l en el período t es menor a la cantidad mínima exigida por ese punto; 0 en caso contrario.

3.3. Formulación

Se presenta la formulación del modelo de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés), que se compone por la función objetivo y las restricciones.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \left(\sum_{i \in O} \sum_{j \in F} \sum_{h \in PD} \sum_{t \in T} \sum_{w \in C} cd_{jh} xd_{ijhtw} + \sum_{i \in O} \sum_{j \in F} \sum_{h \in PD} \sum_{t \in T} \sum_{w \in C} cvd_{wih} yd_{ijhtw} + \right. \\
 & + \sum_{i \in O} \sum_{j \in F} \sum_{l \in PR} \sum_{t \in T} \sum_{w \in C} cr_{jl} xr_{ijltw} + \sum_{i \in O} \sum_{j \in F} \sum_{l \in PR} \sum_{t \in T} \sum_{w \in C} cvr_{wil} (yr_{ijltw} - yp1_{ijltw}) + \\
 & \left. + \sum_{i \in O} \sum_{j \in F} \sum_{i' \in O \setminus \{i\}} \sum_{t \in T} \sum_{w \in C} cvo_{wii'} yo_{iji'tw} + \sum_{i \in O} \sum_{j \in F} \sum_{t \in T} cb_{jit} xb_{ijt} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

sujeto a:

$$\sum_{j \in F} yr_{ijltw} \leq 1, \quad \forall i \in O, \forall l \in PR, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in F} yd_{ijhtw} \leq 1, \quad \forall i \in O, \forall j \in PD, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{j \in F} yo_{iji'tw} \leq 1, \quad \forall i \in O, \forall i' \in O \setminus \{i\}, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in O} \sum_{h \in PD} \sum_{j \in F} yd_{ijhtw} + \sum_{i \in O} \sum_{l \in PR} \sum_{j \in F} yr_{ijltw} + \sum_{i \in O} \sum_{i' \in O \setminus \{i\}} \sum_{j \in F} yo_{iji'tw} \leq qv_{wt} \quad (5)$$

$\forall w \in C, t \in T$

$$xb_{ijt} \leq qm_{jit}, \quad \forall j \in F, \forall i \in O, \forall t \in T \quad (6)$$

$$xd_{ijhtw} \leq kc_{jw}, \quad \forall j \in F, \forall i \in O, \forall h \in PD, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (7)$$

$$xr_{ijltw} \leq kc_{jw}, \quad \forall j \in F, \forall i \in O, \forall l \in PR, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (8)$$

$$xo_{iji'tw} \leq kc_{jw}, \quad \forall j \in F, \forall i \in O, \forall i' \in O \setminus \{i\}, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (9)$$

$$xr_{ijltw} - qe_{jwil} \leq Myp1_{ijltw}, \quad \forall i \in O, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (10)$$

$$qe_{jwil} - xr_{ijltw} \leq Myp2_{ijltw}, \quad \forall i \in O, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (11)$$

$$yp1_{ijltw} + yp2_{ijltw} \leq 1, \quad \forall i \in O, \forall j \in F, \forall t \in T, \forall l \in PR, \forall w \in C \quad (12)$$

$$xb_{ij0} = B_{ij}, \quad \forall j \in F, \forall i \in O \quad (13)$$

$$xb_{ijt} = xb_{ij(t-1)} + qf_{jit} - \sum_{h \in PD} \sum_{w \in C} xd_{ijhtw} - \sum_{l \in PR} \sum_{w \in C} xr_{ijltw} - \sum_{i' \in O \setminus \{i\}} \sum_{w \in C} xo_{iji'tw} \quad (14)$$

$\forall j \in F, \forall i \in O, \forall t \in T$

$$qr_{jl} yr_{ijltw} \leq xr_{ijltw}, \quad \forall j \in F, \forall i \in O, \forall l \in PR, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (15)$$

$$qd_{jh} yd_{ijhtw} \leq xd_{ijhtw}, \quad \forall j \in F, \forall i \in O, \forall h \in PD, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (16)$$

$$xr_{ijltw} \leq NPR_{jl} yr_{ijltw}, \quad \forall i \in O, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (17)$$

$$xd_{ijhtw} \leq NPD_{jh} yd_{ijhtw}, \quad \forall i \in O, \forall j \in F, \forall h \in PD, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (18)$$

$$xo_{iji'tw} \leq NO_{ji'} yo_{iji'tw}, \quad \forall i \in O, \forall j \in F, \forall i' \in O \setminus \{i\}, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (19)$$

$$\sum_{l \in PR} \sum_{w \in C} xr_{ijltw} + \sum_{i' \in O \setminus \{i\}} \sum_{w \in C} xo_{iji'tw} \geq G_{ij} qf_{jit}, \quad \forall i \in O, \forall j \in F, \forall t \in T \quad (20)$$

$$xd_{ijhtw} \geq 0, \forall i \in O, \forall j \in F, \forall h \in PD, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (21)$$

$$xr_{ijltw} \geq 0, \forall i \in O, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (22)$$

$$xo_{iji'tw} \geq 0, \forall i \in O, \forall i' \in O \setminus \{i\}, \forall j \in F, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (23)$$

$$xr_{jit} \geq 0, \forall j \in F, \forall i \in O, \forall t \in T \quad (24)$$

$$yd_{ijhtw} \in \{0, 1\}, \forall i \in O, \forall j \in F, \forall h \in PD, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (25)$$

$$yr_{ijltw} \in \{0, 1\}, \forall i \in O, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (26)$$

$$yp1_{ijltw} \in \{0, 1\}, \forall i \in O, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (27)$$

$$yp2_{ijltw} \in \{0, 1\}, \forall i \in O, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (28)$$

$$yo_{iji'tw} \in \{0, 1\}, \forall i \in O, \forall i' \in O \setminus \{i\}, \forall j \in F, \forall l \in PR, \forall t \in T, \forall w \in C \quad (29)$$

La función objetivo (1) busca minimizar los costos asociados a la gestión de los residuos generados en el horizonte de planificación establecido. Se incluyen los costos de transporte, los costos establecidos por los puntos de recepción y el costo de almacenamiento en obra. Se tienen en cuenta las distintas alternativas de envío y las bonificaciones establecidas por los puntos de revalorización en los casos correspondientes.

Las familias de restricciones (2) a la (4) indican que un camión en un viaje puede trasladar una única fracción desde una obra al punto de destino. La familia (5) indica la máxima cantidad de viajes que puede realizar un camión en un período. El conjunto de restricciones (6) indica la cantidad máxima por fracción que puede quedar sin recolectar en obra al final de un período. De la familia de restricciones (7) a la (9) se establece que la cantidad que traslada un camión no puede exceder su capacidad máxima.

Las familias de restricciones (10) a (12) establecen que el viaje no tiene costo si se llega a cierta cantidad de residuos a enviar, estipulada por el punto de revalorización. Específicamente, la familia (10) activa la variable $yp1_{ijltw}$ si la cantidad enviada es mayor o igual a la mínima exigida, caso en el que no se cobra el flete. La (11) activa la variable $yp2_{ijltw}$ en caso contrario. La (12) no permite que se activen la variable $yp1_{ijltw}$ y la variable $yp2_{ijltw}$ a la vez.

La familia de restricciones (13) establece el inventario inicial en obra para cada fracción, mientras que la (14) asegura el balance de inventario por residuo al final de cada período en cada obra.

Las familias de restricciones (15) y (16) indican la cantidad mínima de recepción por fracción, establecida por los puntos de revalorización y disposición final respectivamente, en caso de que se lleven residuos a esos puntos.

De los conjuntos de restricciones (17) a la (19) se establece qué fracción puede recibir cada punto de destino, y activan las variables binarias yr_{ijltw} , yd_{ijhtw} y $yo_{iji'tw}$ respectivamente. El conjunto (20) indica la meta de valorización por obra, estableciendo el porcentaje mínimo de residuos generados que deben ser valorizados por período. Las familias de restricciones (21) a (29) definen las restricciones de dominio para las variables de decisión del modelo.

3.4. Validación

Para la validación del modelo se efectúan pruebas de validación y un test de carga. Se utiliza una computadora ASUS con sistema operativo de 64 bits Windows, procesador Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1,60GHz 1.80 GHz, 8 GB de RAM. El solver utilizado es CPLEX 20.1.0.0 y el software para codificar el modelo es AMPL. Los resultados de las pruebas de validación se presentan en la Subsección 3.4.1. Los resultados de los test de carga se exponen en la Subsección 3.4.2.

3.4.1. Pruebas de validación

Se realizaron varias pruebas con el fin de validar el modelo, se identificaron errores y se incorporaron mejoras. Los valores asignados a los parámetros para cada prueba, al igual que los resultados obtenidos para las distintas variables se detallan en el [Apéndice 2](#). En todas las pruebas se consideraron dos obras, una fracción de residuos, un punto de disposición final, un punto de revalorización y un camión. En la prueba 8 se consideró un camión adicional.

En la Tabla 3.4.1.1 se presenta un resumen de las pruebas de validación, incluyendo si se alcanza una solución óptima, si los resultados coinciden con los esperados y si se implementan mejoras en el modelo.

Se observa que no en todos los casos se obtuvieron resultados esperados. En estos casos se presentan dos situaciones. Por un lado, si bien el resultado a priori no es el esperado, luego de un análisis se llega a la conclusión de que este es coherente con la realidad modelada. Por otro lado, el resultado no esperado indica algún problema en el modelo, lo que implica cambios en él, llevando a un proceso iterativo de mejoras.

Tabla 3.4.1.1 Resumen de las pruebas de validación. Fuente: elaboración propia

PRUEBA	SOLUCIÓN ÓPTIMA	RESULTADOS ESPERADOS	MEJORAS EN EL MODELO
1	SI	NO	SI
2	SI	SI	NO
3	NO	NO	NO
4	SI	SI	NO
5	NO	NO	NO
6	SI	SI	NO
7	SI	SI	NO
8	SI	SI/NO	SI

Se puede concluir que las pruebas resultaron sumamente útiles, ya que contribuyeron al refinamiento y al entendimiento profundo del modelo, permitiendo un estudio exhaustivo de los resultados obtenidos y conduciendo a mejoras significativas. A continuación se detalla cada una de las pruebas realizadas.

En el primer caso el objetivo es testear el modelo para un caso habitual, en donde se generan residuos en las dos obras y no se presentan restricciones adicionales en los datos. Esto quiere decir que, por ejemplo, hay camiones disponibles con capacidad suficiente para transportar los residuos generados, los mínimos de recepción no son excesivamente altos, entre otros.

En este caso se obtuvo una solución óptima. En la solución obtenida algunas de las variables no concuerdan con los resultados esperados. El primer error es que se envían residuos de una obra a sí misma. En segundo lugar se observa que los valores obtenidos para yp_{ijltw} son iguales a 1, sin embargo en ninguno de los casos se cumple que la cantidad enviada sea mayor o igual a la mínima exigida, por lo que lo esperado es que sean 0.

Por lo tanto, se procede a solucionar el primer error. En el modelo se habían definido dos índices i e i' para referenciar a dos obras distintas, pero no se había indicado explícitamente que referían a obras diferentes. Para esto, se definió el dominio de las variables agregando que $i' \in O \setminus \{i\}$ en los casos correspondientes.

En segundo lugar, se realiza un análisis para la variable yp_{ijltw} . Cabe destacar que para este caso, el modelo aún no contaba con las familias de restricciones (11) y (12) y la

variable $yp1_{ijltw}$ era la variable yp_{ijltw} . En el análisis realizado se observa que si yp_{ijltw} era igual a 1, la familia de restricciones (10) se cumplía para el caso en que la cantidad enviada era mayor o igual a la mínima exigida, pero también se cumplía si era menor. Además, observando la función objetivo (1) se nota que lo más beneficioso para que el modelo minimice los costos, era que yp_{ijltw} siempre fuera 1, aunque esto no represente la realidad modelada.

Para lograr obtener los valores de yp_{ijltw} esperados, se realizan una serie de modificaciones en el modelo. En primer lugar, la variable yp_{ijltw} se reemplaza por la variable $yp1_{ijltw}$ y se introduce una nueva variable binaria $yp2_{ijltw}$. Luego se incorpora la (11) para lograr que la variable $yp2_{ijltw}$ sea igual a 1 cuando la cantidad enviada sea menor a la cantidad mínima exigida. También se añade la (12) de modo que $yp1_{ijltw}$ e $yp2_{ijltw}$ no puedan ser iguales a 1 simultáneamente. De esta forma se espera que $yp1_{ijltw}$ sea igual a 1 solo cuando la cantidad enviada sea mayor o igual a la mínima exigida como se especifica en la (10).

* * *

En la segunda prueba, se repite el caso anterior con el objetivo de validar si las modificaciones realizadas en el modelo son adecuadas.

Se obtiene una solución óptima, con resultados obtenidos iguales a los esperados. No se envían residuos de una obra a sí misma, se cumple con la meta de valorización y se obtienen valores para las variables $yp1_{ijltw}$ e $yp2_{ijltw}$ que cumplen con las restricciones del modelo y el comportamiento esperado. Es decir, se activan correctamente y nunca a la vez. El costo para esta solución óptima se corrobora de forma manual.

* * *

En el tercer caso el objetivo fue testear cómo se comporta el modelo cuando no se generan residuos y tampoco hay residuos en el inventario inicial.

No se obtiene una solución factible, ya que no se cumple con la restricción de balance. Luego de analizar los datos utilizados y el modelo, se concluye que esto se debe a que no se pueden satisfacer las familias de restricciones (15) y (16), que indican la cantidad mínima de recepción por fracción establecida por los puntos de revalorización y disposición final, respectivamente. De acuerdo a los datos indicados, los mínimos de recepción son mayores a cero, pero la cantidad enviada debe ser cero ya que no hay residuos para trasladar, lo que genera una inconsistencia. Por lo tanto es correcto que el modelo no pueda llegar a una solución factible, ya que no puede cumplir los mínimos de recepción qd_{jh} y qr_{jl} exigidos.

* * *

En la prueba cuatro el objetivo fue testear cómo se comporta el modelo cuando no se generan residuos y tampoco hay residuos en el inventario inicial, pero indicando que los mínimos de recepción qd_{jh} y qr_{jl} son iguales a cero, de modo de solucionar la inconsistencia del caso anterior.

Se obtuvo un valor objetivo igual a 0. Se observa que los resultados obtenidos coinciden con los esperados. No se envían residuos a ninguno de los puntos y además los costos son iguales a cero, ya que no hay residuos gestionados ni almacenados en obra.

* * *

En la quinta prueba el objetivo fue testear cómo se comporta el modelo cuando la meta de valorización para cada obra es alta.

En este caso no se alcanzó una solución factible debido a que no se cumple la meta de valorización G_i de cada obra. Esto se debe a tres limitantes relacionadas. Por un lado, la meta de valorización de las obras es alta, por lo que la gran mayoría de los residuos generados debería ser revalorizado. Sin embargo, la cantidad máxima de residuos que pueden transportar los camiones limita la capacidad de traslado en cada viaje. Por otro lado, la restricción en la cantidad de viajes permitidos y la cantidad de camiones disponibles durante el período determinado, impacta directamente en la capacidad de recolección, dejando residuos sin recolectar en las obras. Esta acumulación de residuos sin recoger resulta en que, al finalizar el período no se cumpla con la meta de valorización y no se llegue a una solución factible. Se concluye que si se reduce el porcentaje esperado de revalorización en las obras se espera que si se alcance una solución óptima.

* * *

La prueba seis se llevó a cabo con el fin de validar qué pasa si no todos los residuos pueden ser trasladados. En otras palabras, existe una cantidad máxima de viajes posibles en donde pueden transportarse una cantidad de residuos determinada, que es menor a la cantidad de residuos generados en las dos obras. Se dispone de un solo camión capaz de hacer como máximo tres viajes. Además, se imponen cantidades mínimas de recepción bajas, tanto de los puntos de disposición final como de revalorización. A su vez, la cantidad permitida de residuos generados sin recolectar es alta, con el fin de no restringir el modelo en ese sentido.

Se obtuvo una solución óptima que cumple con los resultados esperados. El camión completa el máximo de viajes, y en cada uno lleva la cantidad máxima de residuos

posible. Además cumple la meta de valorización de las dos obras. La cantidad de residuos generados sin recolectar no supera la cantidad máxima posible.

* * *

La prueba siete estaba destinada a explorar el comportamiento del modelo en situaciones en las que ciertos destinos no pueden recibir residuos. Se realizaron tres casos.

En el caso 7a no se permite el envío de residuos al punto de disposición final. Para lograr esto, se estableció el valor del parámetro NPD_{jh} en cero. Además, para evitar errores, se anuló el mínimo de recepción de este punto, qd_{jh} . Se alcanzaron los resultados esperados obteniendo una solución óptima, en la que no se envían residuos al punto de disposición final.

En el caso 7b se buscó evaluar el comportamiento del modelo cuando no se permite enviar residuos al punto de revalorización. Análogo al primer caso, se fijó el valor del parámetro NPR_{jl} en cero, y se ajustó el mínimo de recepción, qr_{jl} a cero para evitar errores. Se alcanzaron los resultados esperados obteniendo una solución óptima que no envía residuos al punto de revalorización.

Finalmente, se realizó un caso 7c para observar cómo se comporta el modelo cuando no se puede enviar residuos al punto de revalorización ni a una de las dos obras. Por lo tanto, en la otra obra la meta de valorización debe ser igual a cero, ya que no tiene la posibilidad de valorizar los residuos. En este caso también se alcanzó una solución óptima, con los resultados esperados. En la práctica, esta solución podría no ser la más adecuada, ya que la meta de valorización es muy baja y no es coherente con los objetivos de valorización de la empresa.

* * *

La prueba ocho se destinó a explorar el comportamiento del modelo acorde a aumentar las capacidades y la disponibilidad de camiones. Se realizaron tres casos en los que se consideraron dos camiones.

En el caso 8a, el objetivo fue testear el modelo para un caso habitual, pero considerando dos camiones con distinta cantidad máxima de viajes, en el que se generan residuos en las dos obras y no se presentan restricciones adicionales en los datos.

Se alcanzó una solución óptima y los resultados obtenidos coinciden con los esperados ya que no se excede para ninguno de los camiones la cantidad máxima de viajes, las variables binarias funcionan correctamente y se cumple la ecuación de balance. Al

observar las cantidades enviadas a los distintos puntos, resultó llamativo que la cantidad enviada no coincidiera con la capacidad del camión y se realicen varios viajes con poca cantidad. Luego de analizar estos valores, se concluyó que esto se debe a que si se realizan menos viajes pero ocupando la capacidad máxima, no se cumple con los mínimos de recepción de los puntos de revalorización y disposición final.

En el caso 8b el objetivo fue testear el modelo para un caso similar al anterior pero indicando que los mínimos de recepción qd_{jh} y qr_{jl} sean iguales a cero, de forma de observar cómo se comportan las cantidades enviadas respecto a la capacidad de los camiones.

Se llegó a una solución óptima y los resultados obtenidos coinciden con los esperados. No se excede para ninguno de los camiones la cantidad máxima de viajes, las variables binarias funcionan correctamente y se cumple la ecuación de balance. Además, como en este caso los mínimos de recepción no son restrictivos, el modelo realiza menos viajes que en el caso anterior, ya que la cantidad enviada es igual a la capacidad del camión. Esto hace que el costo total sea más bajo que en el caso anterior. Se observa que al punto de disposición final no envía nada, ya que es caro y no contribuye a la meta de valorización. A su vez, se utiliza toda la capacidad del camión cuando se envía a las obras, ya que es lo más barato. El resto de lo que falta enviar, se destina a un punto de revalorización, en el camión que tiene el costo de viaje más bajo.

El caso 8c se realizó para validar una modificación hecha en el modelo. Esta modificación surgió a raíz de los casos anteriores, ya que si bien en el caso anterior se llega a los resultados esperados, no representa la situación real. El problema encontrado en los casos 8a y 8b, y en otros casos realizados anteriormente, es que el modelo obliga a mandar residuos a todos los puntos finales, debido a que el mínimo de recepción de esos puntos es distinto de cero. En la realidad los mínimos de recepción generalmente son distintos de cero, y el modelo debe cumplir estos mínimos solamente si lleva residuos a ese punto.

Por lo tanto se modifican las restricciones (15) y (16). En la versión anterior, utilizada para los casos 8a y 8b y todos los casos anteriores, estas restricciones se definían como:

$$qr_{jl} \leq xr_{ijltw}, \forall j \in F, \forall i \in O, \forall l \in PR, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (15)$$

$$qd_{jh} \leq xd_{ijhtw}, \forall j \in F, \forall i \in O, \forall h \in PD, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (16)$$

Esto implicaba que obligatoriamente se debía enviar a los puntos de disposición final y a los de revalorización al menos la cantidad mínima de recepción. Si no se enviaba nada a alguno de esos puntos, entonces no se cumplían las restricciones. Para solucionar esto, se modifican de la siguiente manera:

$$qr_{jl} yr_{ijltw} \leq xr_{ijltw}, \forall j \in F, \forall i \in O, \forall l \in PR, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (15)$$

$$qd_{jh} yd_{ijhtw} \leq xd_{ijhtw}, \forall j \in F, \forall i \in O, \forall h \in PD, \forall w \in C, \forall t \in T \quad (16)$$

Este cambio permite no enviar residuos a alguno de esos puntos y, en caso de que se envíen, se debe cumplir con el mínimo de recepción, como sucede en la realidad. Los parámetros utilizados para la prueba coinciden con los del caso 8a. Los resultados obtenidos son los mismos que para el caso 8b, lo que implica que las modificaciones realizadas funcionan correctamente.

3.4.2. Test de carga

El objetivo del test de carga fue analizar el comportamiento del tiempo de resolución del modelo a medida que aumenta el tamaño de la instancia del problema. Para esto se analizaron varios casos.

En primer lugar, se aumentó la cantidad de obras y puntos de revalorización y disposición final. En los primeros casos se incrementaron de dos a dos tanto las obras como los puntos finales. Se llegó a doce obras y doce puntos ya que el caso real se aproxima a esas cantidades. Luego se probaron tres casos de borde en donde se aumentan considerablemente estas cantidades para observar el comportamiento del modelo en casos más extremos. En la Tabla 3.4.2.1 se presentan los resultados obtenidos al variar estos parámetros, en los que se pueden observar los tiempos de ejecución, la cantidad de variables y la cantidad de restricciones que conforman el problema ajustado, indicando la complejidad y estructura del modelo durante la resolución para cada caso.

Tabla 3.4.2.1 Valores y resultados del primer test de carga. Fuente: elaboración propia

Obras	Puntos	Tiempo ejecución (s)	Cantidad variables	Cantidad restricciones
2	2	0,125	60	58
4	4	0,203	258	228
6	6	0,11	584	494
8	8	0,157	1.080	910
10	10	0,219	1.764	1.508
12	12	0,297	2.616	2.258
20	20	0,391	7.020	5.828
30	30	2,359	15.930	13.180
40	40	18,672	28.440	23.492

En la Figura 3.4.2.1 se observa que el tiempo de ejecución aumenta a medida que aumenta el tamaño del problema, aunque en ninguno de los casos este tiempo es considerablemente alto.

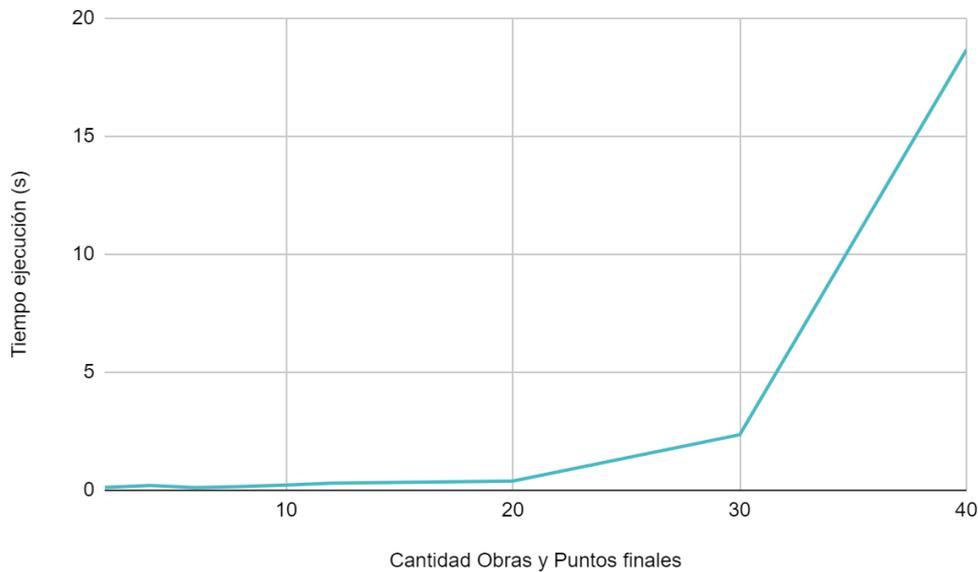


Figura 3.4.2.1 Tiempo de ejecución en función de la cantidad de obras y puntos finales.

Fuente: elaboración propia

En la Figura 3.4.2.2 se puede ver que la cantidad de variables y de restricciones también aumentan al incrementarse el tamaño del problema, llegando a valores relativamente altos para los casos de mayor tamaño.

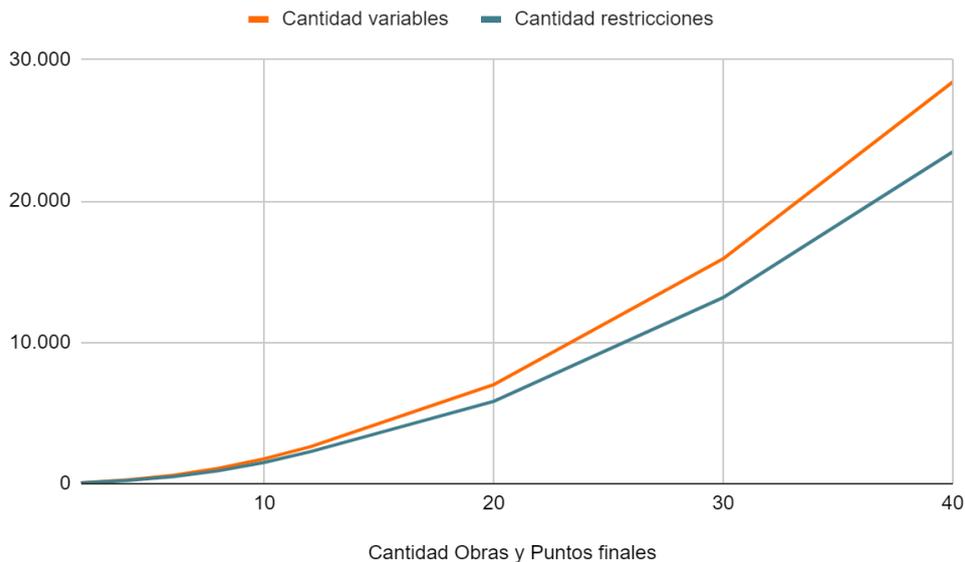


Figura 3.4.2.2 Cantidad de variables y restricciones generadas en función de la cantidad de obras y puntos finales. Fuente: elaboración propia

Por otro lado, se analizó el comportamiento del problema a medida que aumentan las cantidad de fracciones de residuos. Para esto se tomó como caso base diez obras, diez puntos finales y dos fracciones. Esta cantidad de obras y puntos finales se aproxima al caso real. Se incrementó la cantidad de fracciones de dos a dos hasta llegar a diez fracciones en total.

En la Tabla 3.4.2.2 se presentan los tiempos de ejecución obtenidos para cada caso, la cantidad de variables y la cantidad de restricciones que conforman el problema ajustado.

Tabla 3.4.2.2 Valores considerados y obtenidos para el segundo test de carga. Fuente: elaboración propia

10 obras y 10 puntos finales			
Fracciones	Tiempo ejecución (s)	Cantidad variables	Cantidad restricciones
2	0,344	4.420	4.794
4	0,391	8.920	9.294
6	0,594	13.258	13.591
8	0,75	17.596	17.888
10	1,031	21.870	22.065

En la Figura 3.4.2.3 se observa que el tiempo de ejecución aumenta a medida que se incrementa la cantidad de fracciones consideradas. Estos tiempos son relativamente bajos.

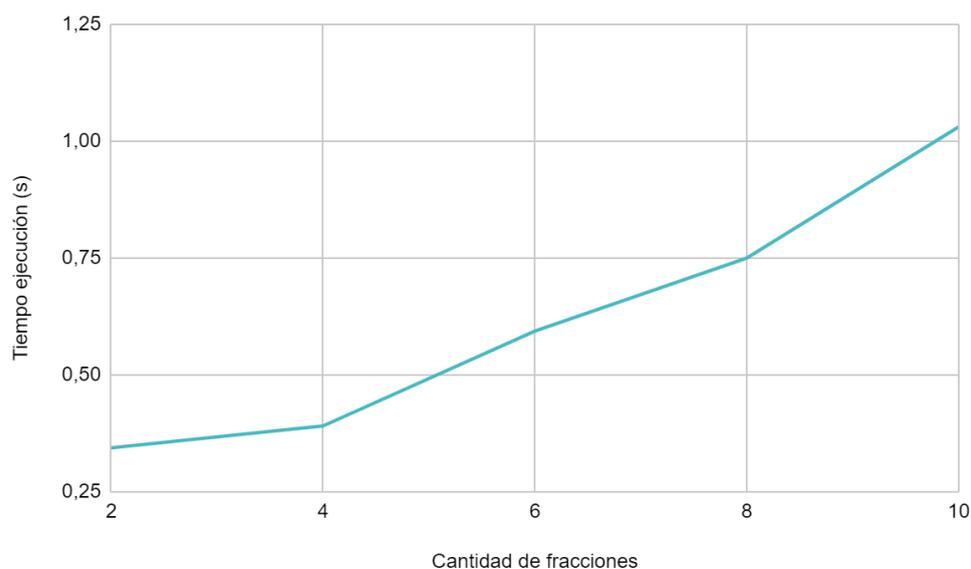


Figura 3.4.2.3 Tiempo de ejecución en función de la cantidad de fracciones. Fuente: elaboración propia

En la Figura 3.4.2.4 se puede ver que la cantidad de variables y de restricciones aumentan linealmente conforme se incrementa la cantidad de fracciones consideradas.

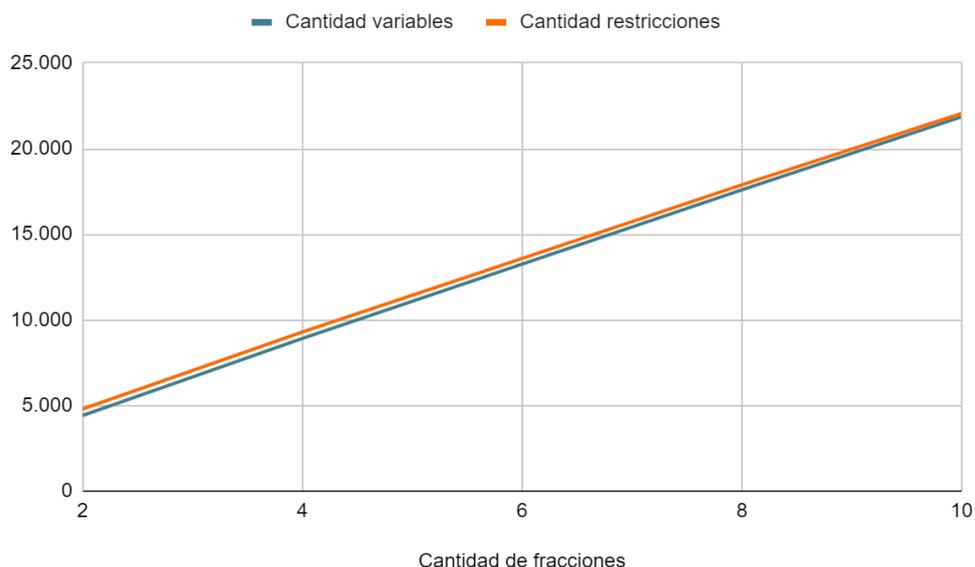


Figura 3.4.2.4 Cantidad de variables y restricciones generadas en función de la cantidad de fracciones. Fuente: elaboración propia

Por último, se analizó el comportamiento del problema a medida que aumentan los períodos considerados. En este caso se consideraron diez obras, diez puntos finales y dos fracciones de residuos, y los períodos considerados se aumentaron de uno en uno hasta seis. En la Tabla 3.4.2.3 se presentan los tiempos de ejecución obtenidos para estos casos, la cantidad de variables y la cantidad de restricciones que conforman el problema ajustado.

Tabla 3.4.2.3 Valores considerados y obtenidos para el tercer test de carga. Fuente: elaboración propia

10 obras, 10 puntos finales y 2 fracciones			
Períodos	Tiempo ejecución (s)	Cantidad variables	Cantidad restricciones
1	0,297	1.764	1.508
2	1,328	6.896	6.564
3	2,015	10.344	9.846
4	2,156	13.792	13.128
5	3,187	17.240	16.410
6	3,313	20.688	19.692

En la Figura 3.4.2.5 se observa que el tiempo de ejecución aumenta conforme se incrementan los períodos considerados.

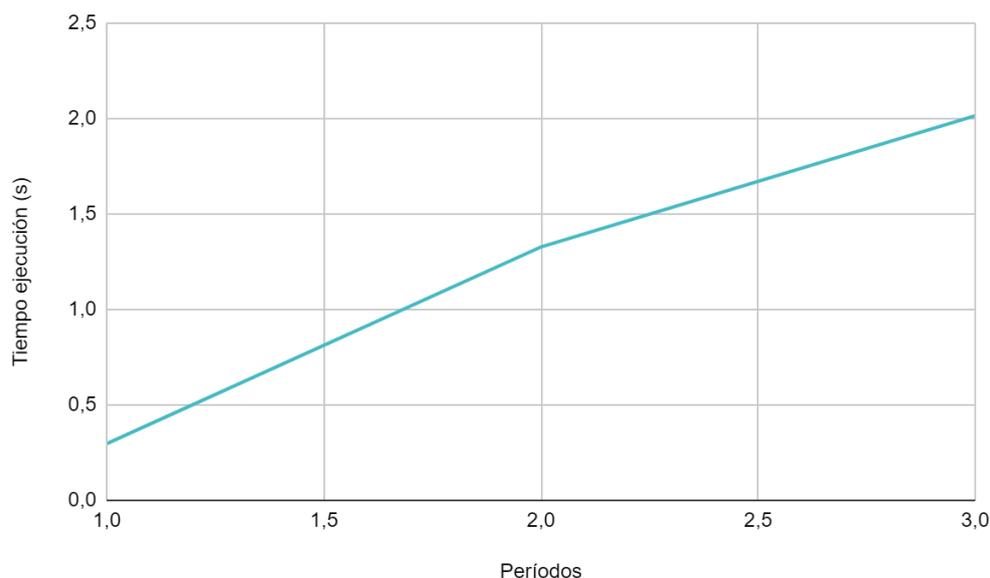


Figura 3.4.2.5 Tiempo de ejecución en función de la cantidad de períodos. Fuente: elaboración propia

En la Figura 3.4.2.6 se puede ver que la cantidad de variables y restricciones también aumenta al incrementarse el tamaño del problema.

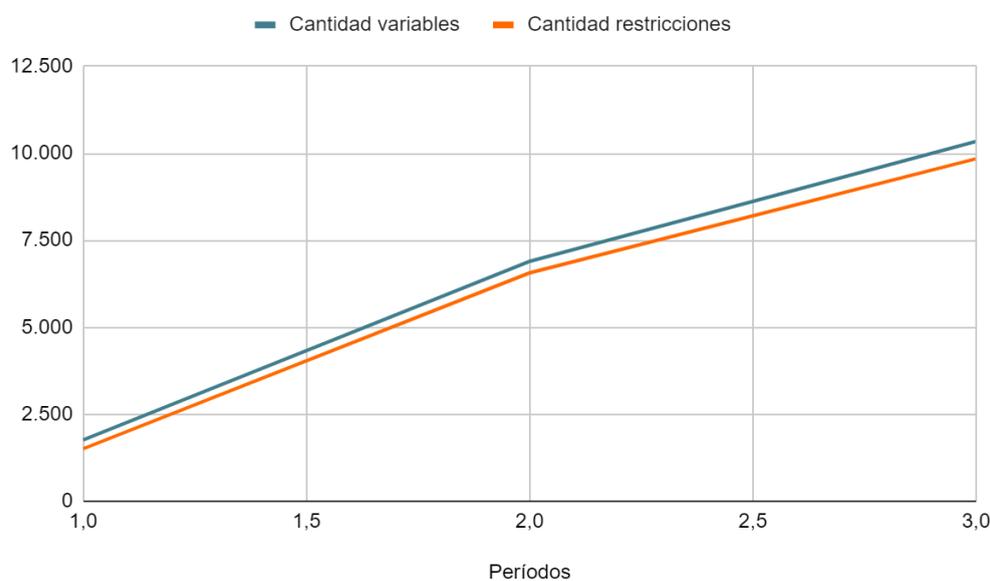


Figura 3.4.2.6 Cantidad de variables y restricciones generadas en función de la cantidad de períodos. Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los casos de prueba realizados, se considera que el tiempo de ejecución del modelo es relativamente bajo para el software de optimización utilizado.

4. Resolución del caso de estudio

La presente sección contiene la información relativa al caso de estudio. En primer lugar se detalla el procedimiento para el relevamiento y la generación de los datos necesarios. Posteriormente, se presentan los datos obtenidos. Finalmente, se analizan los resultados alcanzados para el caso real.

4.1. Relevamiento y generación de datos

A continuación se presenta la metodología utilizada para la generación de los datos necesarios para el modelo matemático introducido en la [Sección 3](#). Luego se exhiben los datos obtenidos.

4.1.1. Metodología

El relevamiento y generación de datos se realiza de acuerdo a la siguiente metodología. En primer lugar, se identifican los datos necesarios para el modelo. Para esto se deben revisar sus conjuntos y parámetros.

Una vez identificados los datos requeridos, se realizan una serie de actividades para su obtención. Entre estas se encuentran:

- Reuniones y comunicaciones vía mail con representantes de la empresa.
- Reuniones y comunicaciones vía mail con empresa gestora de residuos.
- Contacto telefónico o vía mail con los puntos de destino de los residuos.
- Visitas a obras ejecutadas por la empresa.
- Solicitud, obtención y análisis de datos generados por la empresa constructora y la empresa gestora de residuos para el año 2023.
- Asistencia a *Clase Magistral: Economía circular para la construcción - mejores prácticas para la sustentabilidad*, dictada por una de las integrantes de la empresa gestora de residuos. Se logra un mayor entendimiento de las prácticas en la gestión de residuos en el país y en la empresa constructora en particular.

Luego de obtener los datos, se procesan con el fin de limpiarlos y estructurarlos de forma que sea más sencillo trabajar con ellos. Algunos datos se estiman debido a que no se cuenta con información real. Por último, se procede a generar el archivo .dat, que servirá para ejecutar el caso real.

4.1.2. Datos obtenidos

Se presentan los datos obtenidos a través de la metodología detallada anteriormente.

Períodos

El horizonte de planificación considerado es de un año. Dentro de este horizonte, los períodos tienen una duración de un mes, por lo que se tiene un total de 12 períodos.

Obras

Las obras contempladas son las obras activas de la empresa constructora en el año 2023. En la Tabla 4.1.2.1 se presenta el nombre de cada obra, el período de construcción, indicando el mes y año de inicio y fin de dichas obras, el área construida en metros cuadrados y qué tipo de edificación representan.

Tabla 4.1.2.1 Obras activas en 2023. Fuente: elaboración propia

Obras	Inicio - Fin	Área construida (m ²)	Tipo
Ventura	02/22-08/24	12.893	Torre
Domus	07/21-12/23	5.738	Edificio de viviendas
MASMIO	05/22-05/24	8.013	Edificio de viviendas
More	07/20 - 07/24	25.125	Torre
Carrasco Valley	02/21-11/23	11.182	Edificio empresarial
PDLA3	10/21-07/23	2.410	Edificio de viviendas
Cala	04/23 - 10/25	13.630	Torre
Brits	08/23-09/25	615	Residencial

Los datos adicionales de cada obra, que se muestran en la Tabla 4.1.2.1, se presentan ya que son de utilidad para realizar estimaciones de algunos datos necesarios que no se encuentran disponibles.

En el horizonte de planificación seleccionado hay activa una obra en Maldonado, que se deja fuera de este análisis. Esto se debe a que los puntos de destino de residuos disponibles son específicos para el departamento, por lo que no se justifica su inclusión.

Fracciones de residuos

Las fracciones de residuos generadas en las distintas obras son:

- **Escombros:** escombros de hormigón limpio, ticholos, bloques de hormigón o vibrados, ladrillos, revoques, restos de revoques proyectados.
- **Metal:** varillas y mallas de hierro, mechas, clavos, tornillos, perfiles de hierro, perfiles de aluminio, chapa galvanizada, bandeja de chapa (eléctrica), ductos de chapa (aires acondicionados), caños de plomo o hierro (sanitaria), cables.

- **Cartón y papel:** cajas, bolsas de papel (sin plástico), bolsas de cemento sin restos de material, papeles limpios.
- **Plásticos:** film (PEBD), caños abastecimiento (PPL), espuma (EPS), bidones vacíos (PEAD), bolsas plásticas limpias (PEBD), bolsas sin producto de materiales en polvo, cajas de eléctrica.
- **Basura:** chapones plastificados o forrados, lana de vidrio, membrana de losa radiante, cartón sucio o mojado, bloques de revoque y yeso, bolsas de pastas, macillas o húmedos, tablas de madera con CCA, residuos mezclados y todo lo que no se puede limpiar.

Los residuos son clasificados depositándose en el bolsón correspondiente a cada fracción, como se muestra en la Figura 4.1.2.1.

También se obtiene la fracción *basura* que corresponde a residuos mezclados o no plausibles de valorizarse.



Figura 4.1.2.1 Fotografía de bolsones para clasificación de fracciones de residuos en obra. Fuente: ReAcción

Por otro lado, en la obra se clasifican dos fracciones más: madera y compost, pero se dejan fuera de este estudio ya que son casos excepcionales. La madera se separa con el fin de ser utilizada para actividades recreativas dentro de la obra, por lo que en la mayoría de los casos no se lleva a un punto de destino. Por otro lado, el compost se genera en bajas cantidades en relación a los otros residuos y no se considera un residuo de construcción. Además, es gestionado de manera independiente por una empresa que gestiona residuos compostables, que se encarga su recolección y cuyo pago por el servicio es en forma mensual.

Meta de valorización

Las metas de valorización se definen en función de lo conversado con la empresa gestora de residuos, con la empresa de construcción y de datos relevados de informes

del año 2023, en los que se presenta información relacionada a la revalorización o reutilización de los residuos generados.

En la Tabla 4.1.2.2 se presenta la meta de valorización fijada para cada fracción de residuos en cada una de las obras activas. La meta se fija como un porcentaje de los residuos generados en la obra. Además, se define por fracción ya que para el caso de la basura no es posible indicar un valor distinto de cero, debido a que no se puede valorizar esta fracción, porque se compone de residuos mezclados. Para el resto de las fracciones se fija la misma meta dentro de cada obra.

Tabla 4.1.2.2 Meta de valorización por fracción para cada obra. Fuente: elaboración propia

Obras	Meta de valorización por fracción (%)				
	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	50	50	50	50	0
Domus	45	45	45	45	0
MASMIO	30	30	30	30	0
More	30	30	30	30	0
Carrasco Valley	35	35	35	35	0
PDLA3	35	35	35	35	0
Cala	45	45	45	45	0
Brits	45	45	45	45	0

Puntos de disposición final

El punto de disposición final para residuos de construcción disponible en Montevideo es la Usina Felipe Cardoso, que pertenece a la Intendencia de Montevideo. Este punto no tiene un mínimo de recepción fijado.

Puntos de revalorización

La empresa constructora envía sus residuos a puntos de revalorización particulares para cada fracción de residuo. En la Tabla 4.1.2.3 se presentan los puntos con los que trabaja la empresa y las fracciones que reciben cada uno de ellos.

Estos puntos se ubican todos dentro de Montevideo. Ninguno de ellos tiene un mínimo de recepción fijado. De todas formas, se considera de interés conservar este parámetro, ya que según la información recabada existen puntos de revalorización que exigen cantidades mínimas.

Tabla 4.1.2.3 Puntos de revalorización y fracciones recibidas en cada punto. Fuente: elaboración propia

Puntos Revalorización	Fracciones recibidas
Pedernal	Cartón y papel
	Metales
Uruplac	Plásticos
RCD	Escombros

Camiones

La cantidad de camiones considerados se fija de forma tal que puedan gestionarse todos los residuos generados en cada período. Se consideran en este caso 20 camiones disponibles para cada uno.

Los camiones son tercerizados y todos tienen una capacidad de 10 metros cúbicos. En la Tabla 4.1.2.4 se presenta la capacidad de estos camiones para cada fracción de residuos, expresada en kilogramos, de acuerdo a las densidades reportadas por la empresa.

Tabla 4.1.2.4 Capacidad de los camiones para cada fracción de residuos. Fuente: elaboración propia

Fracción de Residuos	Capacidad camiones (kg)
Escombros	5.430
Metal	2.230
Cartón y papel	420
Plásticos	300
Basura	3.030

Para cada camión se define la cantidad máxima de viajes en cada período, que en este caso es la misma para todos los camiones disponibles. Para fijar estas cantidades se considera la cota superior, teniendo en cuenta la cantidad de obras activas en ese período y los puntos de destino a los que se pueden llevar los residuos. Para los meses de enero a marzo, julio, noviembre y diciembre la cantidad máxima es de 54 viajes por camión, ya que se encuentran 6 obras activas. Para los otros meses, esta equivale a 70 viajes, porque hay 7 obras activas.

Residuos generados

Los residuos generados por período en cada obra se presentan en el [Apéndice 3](#). En cada tabla se indica la cantidad de residuos generados en kilogramos y discriminada por fracción.

Los datos de generación de residuos para las obras Ventura y Domus se obtienen de los informes mensuales de Reacción, la empresa gestora de residuos en esas obras. Las generaciones para las demás obras se deben estimar ya que no se cuenta con información suficiente.

A continuación se detallan los criterios de estimación acordados con la empresa constructora. Para la obra MASMIO, se estima la generación en función de los metros cuadrados edificados y la etapa de la obra, usando como referencia los datos de Ventura por tratarse de casos similares. Para More, se estima en función de los metros cuadrados edificados, en relación con Ventura, ya que se trata del mismo tipo de edificación. Para Carrasco Valley, se estima en función de los metros cuadrados considerando como referencia Domus ya que se encuentran en la misma etapa, pero a su vez se disminuye un 20% por tratarse de un edificio empresarial constituido por oficinas, que cuenta con ambientes más amplios lo que implica menor uso de materiales respecto a las otras tipologías. Para PDLA3, se estima en función de los metros cuadrados considerando como referencia Domus, ya que se encuentran en la misma etapa y se trata del mismo tipo de edificación. Para Cala, se considera información extraída de los informes de RCD, empresa gestora de residuos, y además se realizan estimaciones en función de los metros cuadrados, considerando como referencia Ventura ya que se trata del mismo tipo de edificación, pero quitando un 20% por estar en etapa inicial. Por último, para Brits, se considera información extraída de los informes de RCD y se realizan estimaciones en función de los metros cuadrados, considerando como referencia Domus, por tratarse de edificaciones similares.

En los períodos en que las obras se encuentran inactivas, ya sea porque aún no iniciaron o ya terminaron, los residuos generados son iguales a cero. Además, el inventario inicial de las distintas fracciones para todas las obras se fija en cero, ya que no se tienen datos disponibles al respecto.

Máximo de residuos sin recolectar en obra

Para fijar la cantidad máxima de residuos que se pueden dejar sin recolectar en obra al final del período, se calcula el promedio de generación de fracciones de residuos para cada obra. Los resultados se presentan en la Tabla 4.1.2.5.

En función de estos promedios, se fija la cantidad máxima sin recolectar por período como un 10% del promedio de generación, para las obras que cuentan con espacio de almacenamiento, y un 5%, para las obras con espacio reducido. Esto se define junto a la empresa constructora. Las obras con espacio disponibles son: Ventura, More, Carrasco Valley, Cala y Brits. Las obras con espacio reducido son: Domus, MASMIO y PDLA3.

Por otro lado, a las obras que están próximas a finalizar se les reduce un 50% la cantidad máxima el anteúltimo y el penúltimo período previo al de finalización, y se fija como cero en el último período previo al de finalización. Esta estimación fue validada por la

empresa. La cantidad máxima de residuos que se pueden dejar sin recolectar en obra al final de cada período, se presentan en el [Apéndice 3](#).

Tabla 4.1.2.5 Promedio de generación de residuos por fracción para cada obra en el año 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Promedios generación por fracción de residuos (kg)				
	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	20.039	1.160	464	520	18.748
Domus	7.793	259	277	272	12.743
MASMIO	12.424	719	288	322	11.624
More	40.079	2.319	929	1.039	37.496
Carrasco Valley	12.948	414	360	453	20.753
PDLA3	3.713	118	34	77	4.751
Cala	14.522	1.210	322	390	15.265
Brits	828	27	26	40	1.681

Costos

Los costos de recepción de los distintos residuos se recaban a través de consultas con las empresas receptoras. Para el caso de Felipe Cardoso, el costo por tonelada de basura equivale a 1 UR. Debido a la variación de dicha unidad en pesos a lo largo de los períodos, se utilizó un valor promedio. De acuerdo a la información proporcionada por la constructora, el costo de los fletes depende de si el camión es contratado por dicha empresa o por el punto de destino, pero no varía en función de la distancia ni de la fracción de residuos gestionada. Los costos de flete y recepción se presentan en la Tabla 4.1.2.6. El costo negativo implica que el punto de destino paga por recibir los residuos en lugar de cobrar una tarifa.

Tabla 4.1.2.6 Costo de flete y recepción de los puntos de destino. Fuente: elaboración propia

Punto de destino	Costo flete (\$)	Costo recepción (\$/kg)
Pedernal	3.721	-1,0
Uruplac	5.612	3,5
RCD	5.612	2,2
Felipe Cardoso	5.612	1,6
Otra obra	5.612	0

Por otro lado, se tiene el costo de almacenar una fracción de residuos en la obra. Este se estima junto a la empresa ya que no se tienen datos reales. Para ello se consideraron los costos de recepción de los puntos de destino. En la Tabla 4.1.2.7 se pueden observar los costos de almacenamiento para cada una de las fracciones.

Tabla 4.1.2.7 Costo de almacenamiento para las distintas fracciones de residuos. Fuente: elaboración propia

Fracción	Costo de almacenamiento (\$/kg)
Escombros	0,5
Metal	0,1
Cartón y papel	0,1
Plásticos	0,3
Basura	0,5

Algunos puntos de destino fijan un mínimo de recepción para que el flete sea gratis para la empresa constructora. Estos mínimos se presentan en la Tabla 4.1.2.8. Solo Pedernal funciona bajo este mecanismo, por lo que para los demás puntos se fijaron valores grandes, asegurando que no se puedan cumplir. En estos casos, los valores utilizados corresponden a la suma del promedio de generación de la fracción que recibe cada punto de todas las obras.

Tabla 4.1.2.8 Cantidades mínimas de residuos para que el flete al punto de revalorización sea gratis. Fuente: elaboración propia

Puntos Revalorización	Mínimo para fletes gratis (kg)
Pedernal	1.000
Uruplac	3.200
RCD	113.000

Números de activación de variables

Establecer un valor adecuado para los números de activación de las variables binarias facilita la resolución al solver. Por lo tanto, estos se establecieron de manera de garantizar que sean lo suficientemente grandes en función de la realidad modelada, pero no excesivamente altos de forma de no generar ineficiencias en la resolución.

El número de activación M se fija como 125.000, que representa la suma de los promedios de generación de todas las fracciones que se pueden revalorizar en todas las

obras. El número de activación NPD_{jh} toma los valores que se presentan en la Tabla 4.1.2.9. Estos se definen como la suma de los promedios de generación de todas las obras para cada fracción.

Tabla 4.1.2.9 Valores definidos para NPD_{jh} . Fuente: elaboración propia

Punto de disposición	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Felipe Cardoso	113.000	6.300	2.700	3.200	124.000

El número de activación NPR_{jl} toma los valores que se presentan en la Tabla 4.1.2.10. Estos se definen como la suma de los promedios de generación de todas las obras para cada fracción. Los que se definen como cero se debe a que no se puede enviar esa fracción al respectivo punto de revalorización.

Tabla 4.1.2.10 Valores definidos para NPR_{jl} . Fuente: elaboración propia

Punto de valorización	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Pedernal	0	6.300	2.700	0	0
URUPLAC	0	0	0	3.200	0
RCD	113.000	0	0	0	0

En la mayoría de los casos el número de activación $N0_{ji'}$ es cero ya que las obras no están en condiciones de recibir escombros. Cala y Brits pueden recibir escombros para utilizar como relleno, ya que se encuentran en etapa inicial. Por lo tanto, para ambas obras se define este valor en 1.300, de forma tal que pueden recibir una cantidad limitada de las demás obras.

4.2. Análisis de resultados del caso de estudio

En esta sección se presenta el análisis de los resultados obtenidos, utilizando como obras de referencia Ventura y Domus. Estas se seleccionaron por su tamaño –Ventura es una obra de gran envergadura y Domus una de menor escala– y porque se dispone de una mayor cantidad de datos reales para ambas. Los resultados de las demás obras se analizarán en función de los obtenidos para Ventura y Domus, sin perder de vista las particularidades de cada caso. De todas formas, el resumen de los resultados para las obras restantes se encuentran en el [Apéndice 4](#).

Para iniciar el análisis de los resultados, se presenta primero la composición de los residuos generados en las distintas obras. Esta información permite conocer las proporciones de los distintos residuos en la generación global, que influye en los resultados obtenidos.

Es importante aclarar que en la composición de la generación de residuos, se tienen en cuenta los residuos que se generaron y fueron clasificados en un tipo de fracción específica. Por lo tanto, en una obra puede generarse una mayor cantidad de una fracción que la cantidad declarada como generada, ya que si se mezcla con otros residuos se cataloga como basura.

La Figura 4.2.1 muestra la composición por fracción de los residuos generados en Ventura en el horizonte de tiempo elegido.

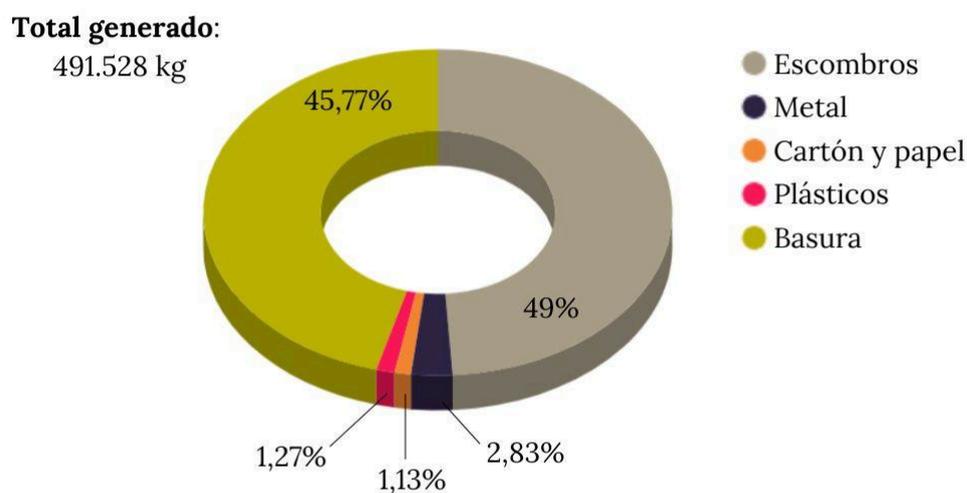


Figura 4.2.1 Composición por fracción de los residuos generados en Ventura en el 2023. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, casi el 50% de los residuos generados en Ventura corresponde a la fracción de escombros, seguido por la basura con un porcentaje ligeramente superior al 45%. El 5% restante representa la cantidad total de metales, plásticos, cartón y papel generados en la obra. Esta composición es muy similar en las obras MASMIO,

More y Cala, ya que Ventura se utilizó como base para determinar la generación de residuos en estas.

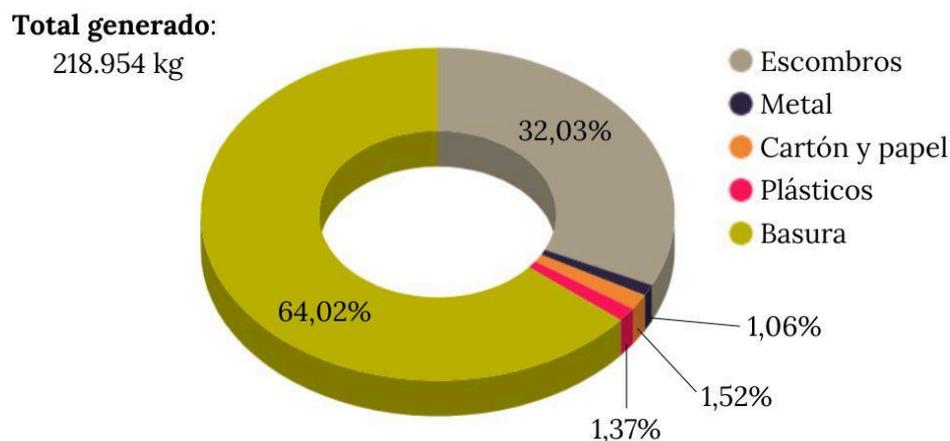


Figura 4.2.2 Composición por fracción de los residuos generados en Domus en el 2023.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.2.2 se presenta la composición de residuos en Domus. En esta obra, el residuo más generado es la basura, representando el 64% del total. La siguiente fracción más generada es escombros, que representa aproximadamente la mitad de la cantidad de basura generada. El porcentaje restante corresponde a la generación de las demás fracciones. Esta composición es representativa de las obras Carrasco Valley, PDLA 3 y Brits.

Una vez generados y clasificados los residuos, es necesario gestionarlos. La gestión de cada fracción de residuo implica tres enfoques posibles: valorizar el residuo, disponerlo o almacenarlo temporalmente en la obra, es decir, mantenerlo en inventario hasta que se lleve a un punto de disposición o valorización. Cada uno de estos enfoques conlleva costos diferentes y la decisión sobre cuál tomar se puede determinar mediante la solución óptima del modelo, cuyo objetivo es minimizar los costos.

Es importante destacar que más del 90% de los residuos generados en todas las obras corresponde a escombros y basura. Por lo tanto, su gestión juega un papel esencial en los costos y en la solución alcanzada.

La solución obtenida es una solución óptima, cuyo valor objetivo es de \$9.714.000 (nueve millones setecientos catorce mil pesos uruguayos). La relevancia de este valor se hace evidente para la empresa al compararlo con otros valores, como el costo total de llevar a cabo la construcción de una obra arquitectónica. Además, es un dato elemental para evaluar una gestión más eficiente de residuos en sus obras.

En la Figura 4.2.3 se presentan los resultados obtenidos en esta solución óptima para la gestión de residuos en Ventura. En esta gráfica de barras, la barra azul corresponde a la generación de todos los residuos. La barra roja representa aquellos residuos que se

destinan a disposición final, mientras que la barra verde muestra la cantidad a valorizar. La barra gris representa la cantidad que queda como inventario en obra en ese período.

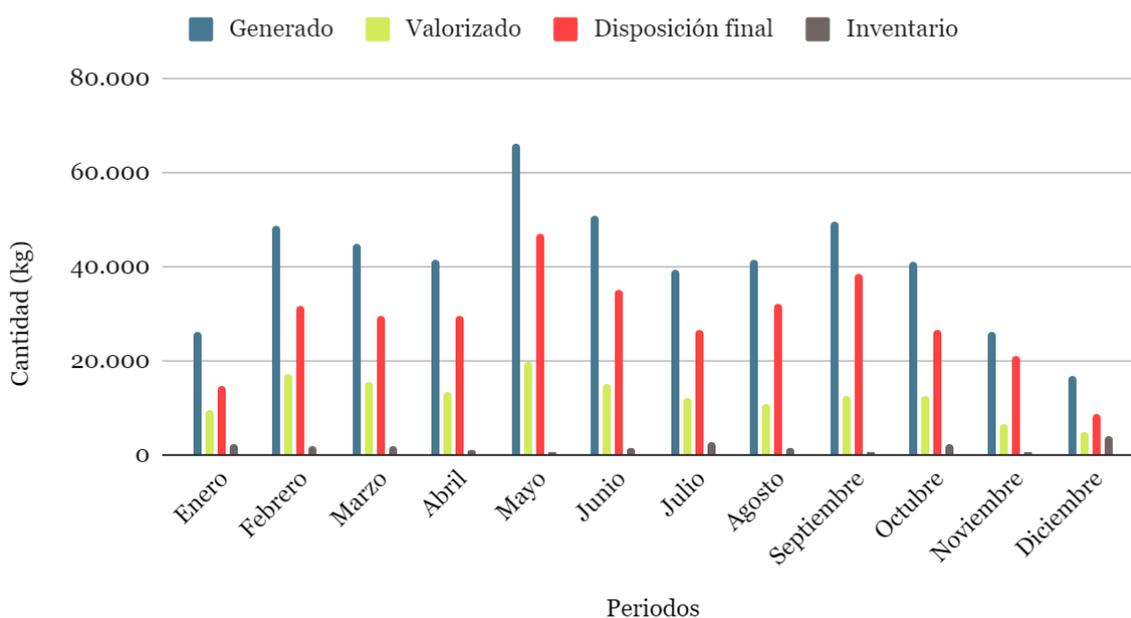


Figura 4.2.3 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en Ventura en el 2023. Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede observar en la Figura 4.2.3, hay un gran porcentaje de residuos que se destinan a disposición final. Esto se debe principalmente a la disposición de basura. Como se mencionó anteriormente, aproximadamente el 45% de los residuos generados en Ventura son basura, y esta es la única fracción de residuo que no se puede valorizar. Por lo tanto, todo lo que se genera en un período se lleva a disposición final o se deja en inventario para disponerlo en próximos períodos. Sin embargo, el espacio para almacenar basura en la obra es muy limitado, por lo que el 90% o más de lo que se genera se lleva a disposición final. La excepción se da en diciembre, cuando se acumula en obra una cantidad mayor al 20% de lo generado.

Al igual que con la basura, el espacio de almacenamiento en obra para acumular cualquiera de los otros residuos es muy limitado, por lo que gran parte de lo que se genera en un período se destina, ya sea a disposición final o a un punto de valorización. Es interesante destacar que las fracciones de metal y cartón y papel, a excepción de un período, no se dejan acumuladas en inventario y no se llevan a disposición final; ambas fracciones se valorizan al 100%. Esto no solo se debe a la meta de valorización estipulada para la obra, sino también a que el punto de revalorización que recibe estos residuos paga a la empresa por llevarlos. Al modelar esta realidad a través de un modelo de optimización que busca minimizar los costos, revalorizar metal, cartón y papel se vuelve lo más beneficioso.

Por otro lado, en las fracciones de escombros y plásticos, el porcentaje de valorización está por encima del 50% del total. Lo que queda en inventario es un porcentaje poco significativo, a excepción de algún período en que se acumula entre el 20 y el 30% de lo generado en la obra.

Este comportamiento es similar en las obras MASMIO, More y Cala. Estas tienen una composición de residuos parecida a la de Ventura, por lo que la distribución de la gráfica en el horizonte de tiempo es similar. En MASMIO, el espacio de almacenamiento en obra es aún menor y en la mitad de los períodos no queda nada en inventario, mientras que el porcentaje de valorización es ligeramente menor que en Ventura. More, al ser la obra más grande en metros cuadrados, genera una cantidad más elevada de residuos que el resto. En comparación con Ventura, el porcentaje de valorización en More es significativamente menor, dado que la meta de valorización de dicha obra también lo es. Por último, aunque Cala comienza en abril, en los meses que está activa se asemeja a la gestión de Ventura, con porcentajes de valorización prácticamente iguales.

De manera similar a Ventura, se presenta la Figura 4.2.4 donde se muestran los resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en Domus.

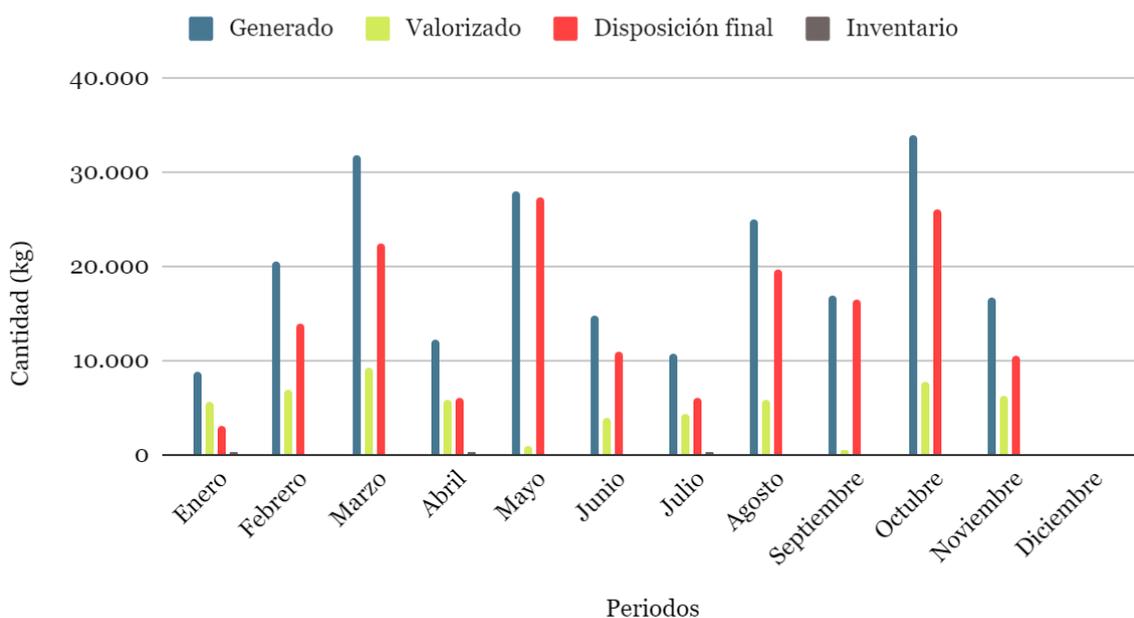


Figura 4.2.4 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en Domus en el 2023. Fuente: Elaboración propia

Tal como se vio en los casos anteriores, el porcentaje de disposición final es significativamente mayor que lo que se valoriza de residuos a nivel global. Esto se debe principalmente a la gran proporción de basura generada que supera el 60% del total. Además, se puede ver que casi no se dejan residuos en la obra, salvo en algunos meses, debido al poco espacio de almacenamiento disponible, ya que se trata de una obra pequeña con espacio reducido en general. Como resultado, los residuos generados

excepto la basura, son trasladados casi automáticamente a un punto de disposición o de valorización. En el caso de los residuos metal, cartón y papel, el 100% de lo generado es valorizado en el mismo período. La principal razón de la valorización total de estos residuos es el beneficio económico y se aplica en las ocho obras estudiadas. En el caso de los escombros, el porcentaje de valorización supera el 70% del total generado. Además, se revaloriza casi el 60% de los plásticos. Esto implica que más del 80% de los residuos generados valorizables, es decir con potencial a ser valorizados, son efectivamente revalorizados o reutilizados en la obra.

Casos similares a Domus son los de Carrasco Valley, PDLA3 y Brits. Carrasco Valley es la segunda obra más pequeña en metros cuadrados después de Domus aunque presenta un mayor espacio disponible para almacenamiento, reflejando en la solución obtenida un mayor uso de este espacio. PDLA 3 enfrenta el mismo problema que Domus, con poco espacio para almacenar residuos en la obra, resultando en un inventario final de cero en cada período. Aunque el comportamiento global de la obra es similar al de Domus, el porcentaje de revalorización de las fracciones valorizables es del 100%, siendo la única obra que valoriza en su totalidad los residuos generados que no son basura. Brits le sigue con casi un 100% de valorización de los residuos valorizables, en los cuatro meses que se encuentra activa.

A pesar de que en todas estas obras el porcentaje de valorización es alto, la basura representa más del 60% de lo generado en todo 2023. Esto significa que más del 60% de los residuos generados en las obras irá a disposición final.

Resulta interesante entonces analizar los resultados para la gestión de los residuos que sí se pueden valorizar. Entre las fracciones valorizables se encuentran los escombros, que pueden ser revalorizados llevándolos a RCD o reutilizándolos en otras obras de la empresa; los metales, el cartón y el papel, que se pueden revalorizar enviándolos a Pedernal; y los plásticos, que se pueden enviar al punto de revalorización Uruplac.

En la Figura 4.2.5 se presentan los resultados obtenidos para Ventura, en donde se puede ver la cantidad de residuos con potencial de valorización que se generan mensualmente y la cantidad que finalmente se valoriza. Se observa que, en la mayoría de los meses se valoriza más del 50% de los residuos generados, y en los últimos meses el porcentaje supera el 60%.

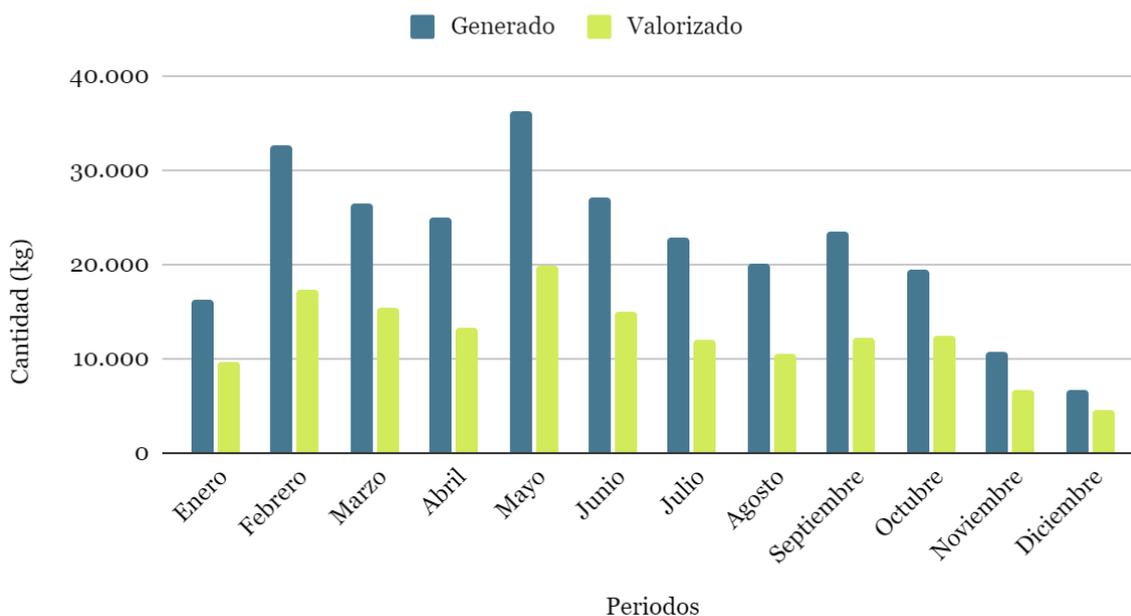


Figura 4.2.5 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en Ventura 2023. Fuente: Elaboración propia

El comportamiento observado para Ventura es similar para el caso de MASMIO, Cala y More. En el caso de Cala, el porcentaje de valorización oscila entre el 50% y el 70%, al igual que en Ventura. Sin embargo, Cala comienza en abril, por lo que los residuos empiezan a gestionarse a partir de ese mes. Por otro lado, tanto en MASMIO como en More se observa un comportamiento similar al de la Figura 4.2.1.5, pero el porcentaje de valorización es inferior al de Ventura, situándose entre el 30% y el 50%, con algunos valores superiores en los últimos meses.

En la Figura 4.2.6 se puede observar la gestión de residuos valorizables para el caso de Domus, presentando la cantidad mensual generada de residuos con potencial de valorización y la cantidad a valorizar de acuerdo a la solución obtenida. En este caso, la cantidad de residuos valorizados supera el 45%, alcanzando en algunos meses porcentajes cercanos o iguales al 100%. Se puede observar que para esta obra, los porcentajes de valorización son superiores a los de las obras presentadas anteriormente, pero por otro lado, la cantidad de residuos valorizables generados es menor.

Para el caso de Carrasco Valley, se observa un comportamiento similar al de Domus. Aunque en Carrasco Valley se genera una mayor cantidad de residuos y en algunos meses los porcentajes de valorización son inferiores respecto a Domus. El porcentaje de valorización para Carrasco Valley oscila entre el 40% y el 60%, aunque en algunos meses se obtienen valores superiores al 80%.

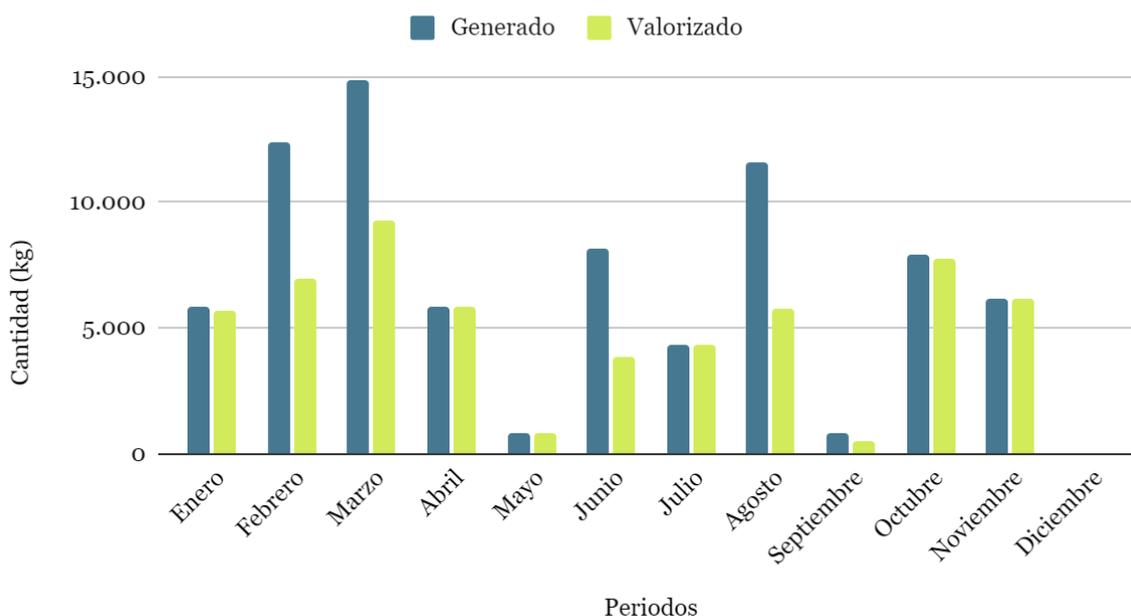


Figura 4.2.6 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en Domus 2023. Fuente: Elaboración propia

Por último, se tienen las obras PDLA3 y Brits. En estos casos particulares, se observa que todos los residuos generados con potencial de valorización son finalmente valorizados, alcanzando así un porcentaje de valorización del 100%. Esto puede deberse a que, al ser obras que generan una baja cantidad de residuos mensuales, se necesita solo un viaje para trasladar cada una de las fracciones valorizables. Dado que se debe cumplir con la meta fijada para la valorización, esos viajes se envían a puntos de revalorización o reutilización, implicando que el 100% de los residuos sean valorizados.

Por otro lado, en la mayoría de los casos se observa que una parte de los escombros valorizados se envía a Cala y Brits para su reutilización. Sin embargo, un inconveniente es que estos escombros se envían antes de que las obras comiencen a operar. Aunque el modelo se comporta correctamente al no haber restricciones al respecto, sería deseable mejorarlo en futuros trabajos para evitar esta situación.

Para profundizar en el análisis de los resultados obtenidos sobre la valorización de residuos, se presenta la Tabla 4.2.1. En esta Tabla se pueden ver los porcentajes de valorización por fracción de residuos para cada obra y compararlos con las metas fijadas para cada una. En la primera columna de la Tabla se listan las obras, en la segunda se detallan las metas por fracción para cada obra, siendo estas iguales para todas las fracciones dentro de una misma obra. Las columnas restantes representan los porcentajes de cada uno de los residuos que efectivamente se valorizaron en cada una de estas.

Tabla 4.2.1 Porcentajes de valorización de residuos y metas fijadas para cada obra. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Meta por fracción	Valorización			
		Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos
Ventura	50%	52%	100%	100%	59%
Domus	45%	71%	100%	100%	59%
MASMIO	30%	40%	100%	100%	56%
More	30%	35%	100%	100%	37%
Carrasco Valley	35%	48%	100%	100%	48%
PDLA 3	35%	100%	100%	100%	100%
Cala	45%	54%	100%	100%	56%
Brits	45%	100%	100%	100%	98%

En todos los casos, se observa que las fracciones correspondientes a metal, cartón y papel tienen un porcentaje de valorización del 100%. Esto puede deberse a que estas fracciones pueden ser enviadas a Pedernal, que paga a las obras por cada kilogramo de residuos enviado. Por lo tanto, enviar estos residuos a este punto de revalorización resulta beneficioso para minimizar los costos asociados a su gestión.

Por otro lado, se puede ver que el porcentaje de valorización para los escombros es superior a la meta fijada, aunque en algunos casos ligeramente. Esto se debe en primer lugar a que RCD, el punto de revalorización de los escombros, ofrece un precio de recepción de residuos superior al punto de disposición final. Aunque se envían residuos para cumplir con la meta establecida, otra forma de valorizar los escombros es enviándolos a las obras Cala y Brits para su reutilización. Esta forma de valorización resulta más económica que llevar los escombros a disposición final, ya que el único costo asociado es el del transporte. No obstante, está limitada la cantidad de residuos que puede ser enviada a estas obras.

Por último, se puede observar el comportamiento en la gestión de los plásticos. En este caso, el único punto de revalorización es Uruplac, que tiene un costo de recepción que duplica al del punto de disposición final. Debido a esta diferencia en costos, aunque el porcentaje de valorización cumple con la meta, no es significativamente superior a esta. Los casos en los que los porcentajes son superiores pueden estar relacionados con la capacidad de los camiones que realizan los fletes, así como con las cantidades generadas de plástico que no son altas.

Los resultados obtenidos para PDLA 3 y Brits en la gestión de escombros y plásticos difieren del análisis anterior. Como se explicó previamente, esto puede atribuirse a la baja cantidad de residuos generados en las obras, en combinación con las metas de valorización establecidas y la capacidad de los camiones para cada fracción.

En líneas generales, de acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 4.2.1.1, en esta solución para la gestión de residuos se obtiene un porcentaje de valorización promedio del 63% para escombros, 64% para plásticos y 100% para metales, cartón y papel. Por otro lado, es importante destacar que la fracción correspondiente a la basura no tiene posibilidades de valorización, y representa alrededor del 50% o más de los residuos generados en las distintas obras.

Por otro lado, se analizan los viajes que realizan los camiones para las dos obras de referencia. Primero se analizan los viajes para gestionar los residuos de Ventura ya que es una obra con alta generación de residuos. Luego, se examinan los viajes para Domus, pues es una obra más pequeña y, por lo tanto, con una menor generación de residuos.

En la Tabla 4.2.2 se presenta la utilización de la capacidad de los camiones en los viajes necesarios para gestionar los residuos en Ventura en 2023. En la primera columna se listan las fracciones; en la segunda, la cantidad de viajes necesarios para gestionar las distintas fracciones; en la tercera columna se indica la cantidad de viajes realizados con el 100% de la capacidad utilizada; en la cuarta los viajes que utilizan más del 50% de la capacidad pero no van completos; y en la quinta los viajes que usan menos del 50% de la capacidad del camión.

Tabla 4.2.2 Viajes a realizar para gestionar los residuos en Ventura 2023 y capacidad utilizada de los camiones en los viajes. Fuente: elaboración propia

Utilización de la capacidad de los camiones - Ventura 2023				
Fracciones	Viajes	= 100%	≥ 50% y < 100 %	< 50%
Escombros	49	34	10	5
Metal	15	0	5	10
Cartón y papel	19	8	6	5
Plásticos	24	8	16	0
Basura	74	71	3	0

Al analizar la capacidad utilizada para transportar los escombros, se observa que la mayoría de los viajes emplean el 100% de la capacidad de los camiones. En aquellos que utilizan más del 50% pero no alcanzan el 100%, esto se debe a la insuficiencia del espacio de almacenamiento en la obra. En estos casos, aunque no se complete la capacidad del camión, es necesario disponer de los escombros ya que no se pueden almacenar y trasladar en el siguiente período. Por otro lado, los viajes que emplean

menos del 50% de la capacidad son aquellos en los que los escombros se transportan a otras obras para su reutilización. Como se mencionó anteriormente, esta cantidad está limitada para cada viaje y es menor al 50% de la capacidad del camión.

En el caso de los metales, se observa que ningún viaje completa la capacidad de los camiones. Esto se debe a dos razones principales. Primero, en la mayoría de los períodos, la cantidad de residuos metálicos generados no alcanza la capacidad del camión. Segundo, la cantidad máxima que se puede acumular en obra para esta fracción es baja. Por lo tanto, aunque no se complete la capacidad del camión, se deben disponer los residuos en ese período. En los períodos en que se genera una cantidad mayor o igual a la capacidad del camión, los viajes igualmente se realizan con la capacidad incompleta. Esto se debe a que para los metales, si se alcanza una cantidad específica, que es menor a la capacidad del camión, el viaje es gratuito. Por lo tanto, para minimizar los costos, es indistinto realizar un viaje completo o varios viajes con la cantidad que permite que el flete sea gratuito.

Para las demás fracciones, cartón y papel, plásticos y basura, los viajes se realizan utilizando la máxima capacidad posible de los camiones. Cuando se utiliza una capacidad menor al 100% es porque la cantidad máxima que se puede acumular en la obra no es suficiente para almacenarlos y así poder disponer de ellos en el siguiente período, de manera más eficiente en términos de utilización de la capacidad de los camiones. Además, es necesario cumplir con la meta de valorización en cada período, por lo que algunos viajes no se pueden evitar.

En la Tabla 4.2.3 se presentan la cantidad de viajes necesarios para gestionar las distintas fracciones de residuos generadas en Domus en 2023. Además, al igual que para el caso de Ventura, se puede ver la utilización de la capacidad de los camiones en esos viajes.

Tabla 4.2.3 Viajes a realizar para gestionar los residuos en Ventura 2023 y capacidad utilizada de los camiones en los viajes. Fuente: elaboración propia

Utilización de la capacidad de los camiones - Domus 2023				
Fracciones	Viajes	= 100%	≥ 50% y < 100 %	< 50%
Escombros	16	5	9	2
Metal	9	0	0	9
Cartón y papel	14	3	3	8
Plásticos	17	1	10	6
Basura	49	42	5	2

El análisis de la utilización de la capacidad de los camiones en los viajes para Domus es análogo al realizado para Ventura. Sin embargo, en este caso se debe tener en cuenta

que la obra es más pequeña, generando menos residuos y disponiendo de un espacio de almacenamiento más reducido que en Ventura. Esto implica que, aunque se realicen menos viajes, se utilice una menor capacidad de los camiones en los distintos viajes para cada una de las fracciones.

Como se generan menos residuos, es más difícil completar la capacidad del camión en los distintos períodos. Además, el espacio limitado para almacenar residuos en obra restringe la acumulación, lo que impide completar los camiones en la mayoría de los casos. Una excepción es la basura, ya que es el residuo que más se genera, el que tiene la mayor cantidad permitida para almacenar en obra y no tiene meta de valorización.

En resumen, los resultados obtenidos reflejan una estrategia de gestión de residuos centrada en la minimización de costos, que se evidencia con la maximización de la valorización para fracciones como metales, cartón y papel, con lo que se logra alcanzar un porcentaje de valorización del 100%. Sin embargo, persisten desafíos en la gestión de escombros y plásticos, ya que si bien se cumple con las metas de valorización, los porcentajes obtenidos podrían ser mejorados. Además, la presencia significativa de la fracción de basura, que no cuenta con opciones de valorización, subraya la necesidad de explorar estrategias adicionales para reducir su impacto en la gestión global de residuos.

5. Análisis de sensibilidad

En esta sección se presentan los resultados para los análisis de sensibilidad realizados, tomando como base el caso real. Estos análisis se realizan con el fin de observar cómo cambian las soluciones obtenidas con el modelo al variar los valores de algunos parámetros.

5.1. Caso I: Capacidad de recepción de escombros en obras

En el primer análisis, se realizan variaciones en el valor del parámetro NO_{j_i} para las obras Cala y Brits con el objetivo de modificar la cantidad de escombros que pueden recibir desde otras obras. Para ello, se consideran tres escenarios distintos:

1. El valor del parámetro se fija en cero, lo que permite observar qué ocurre si esas obras ya no pueden recibir escombros.
2. En el segundo escenario, se duplica el valor del parámetro, analizando así el efecto de una mayor capacidad de recepción de escombros.
3. En el último caso, el valor del parámetro se incrementa hasta igualar la capacidad del camión para transportar escombros.

En estos dos últimos casos, se estudia el impacto de permitir que las obras reciban una mayor cantidad de escombros.

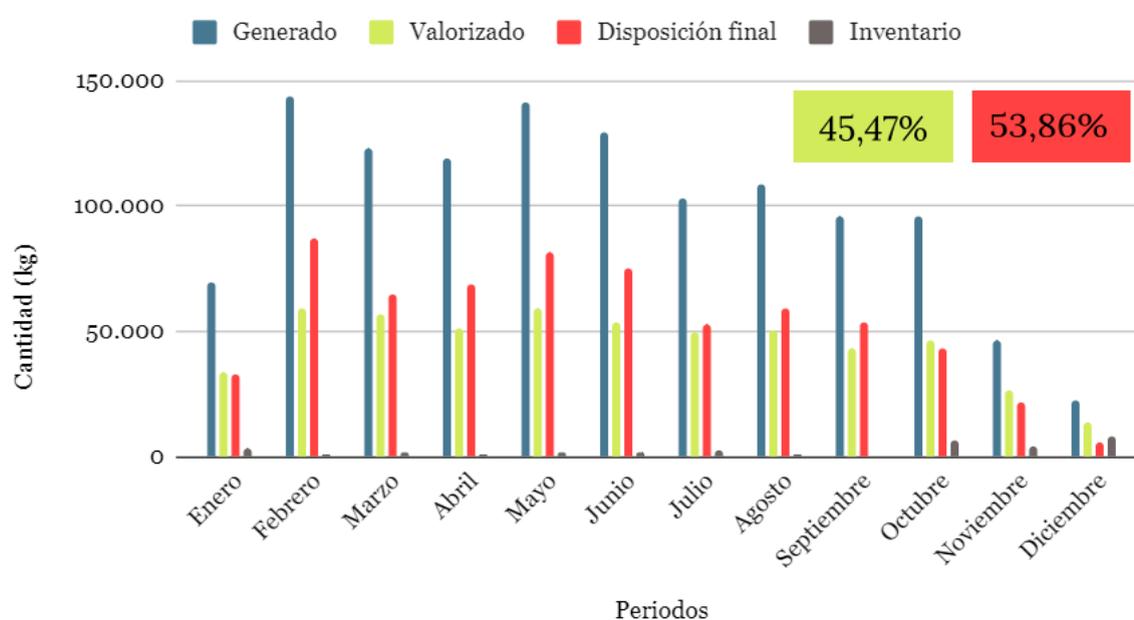


Figura 5.1.1 Gestión de escombros 2023 para el caso real, en que $NO_{j_i} = 1.300$ para Cala y Brits. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.1.1 se presentan los resultados obtenidos en el caso real para la gestión de escombros de todas las obras en 2023. Se muestra la cantidad de escombros generados en cada período, la cantidad enviada a disposición final, la cantidad que queda en inventario y la cantidad valorizada tanto en RCD como en las obras Cala y Brits, donde se envían para su reutilización. En este caso, solo el 6% de los escombros valorizados se destinan a estas dos obras. Además, se presenta el porcentaje de valorización de escombros, que alcanza el 45,47%, y el porcentaje enviado a disposición final, que llega al 53,86%. Se puede observar que la cantidad almacenada en inventario es muy baja.

El primer caso de este análisis consiste en observar qué ocurre si no se pueden enviar residuos a Cala y Brits. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.1.2, donde se observa que la variación respecto al escenario real es casi nula. Se nota una disminución muy leve en el porcentaje de escombros valorizados y, en consecuencia, un aumento mínimo en los escombros destinados a disposición final. Además, se registra un pequeño aumento en los costos, que equivale al 0,27%.

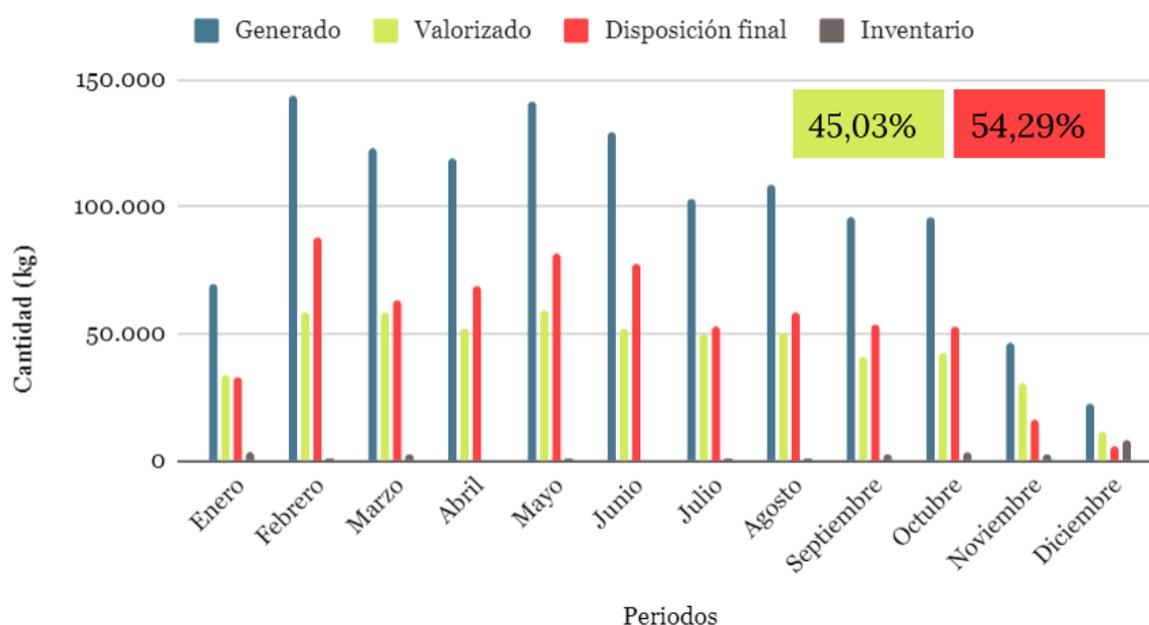


Figura 5.1.2 Gestión de escombros 2023 para el caso en que $NO_{ji_p} = 0$ para todas las obras.

Fuente: Elaboración propia

Este resultado puede deberse a dos razones. En primer lugar, el porcentaje de residuos valorizados en Cala y Brits ya era muy bajo, por lo que la variación del parámetro apenas repercute en los resultados. En segundo lugar, la disminución del porcentaje de valorización puede explicarse porque los residuos que antes se destinaban a Cala y Brits, ahora se envían a disposición final. Esta opción es más económica en comparación con RCD, que sería el único punto de revalorización para esta fracción.

El segundo caso consiste en analizar qué sucede si se duplica la cantidad de escombros que se pueden enviar a Cala y Brits desde las demás obras. Los resultados obtenidos para este escenario se presentan en la Figura 5.1.3, donde se observan variaciones significativas. El porcentaje de valorización de escombros aumenta de 45,47% a 97,72%, y, por ende, el porcentaje de escombros destinados a disposición final disminuye a 1,88%. Además, los costos se reducen un 11% aproximadamente.

Este resultado puede explicarse porque el costo de recepción en las obras es nulo y enviar escombros a las obras contribuye a la meta de valorización fijada. Por lo tanto, si se permite enviar una mayor cantidad de escombros a las obras, el modelo prioriza esta opción hasta el límite permitido, enviando el resto a disposición final, que es más económico que enviar a RCD, la otra opción disponible.

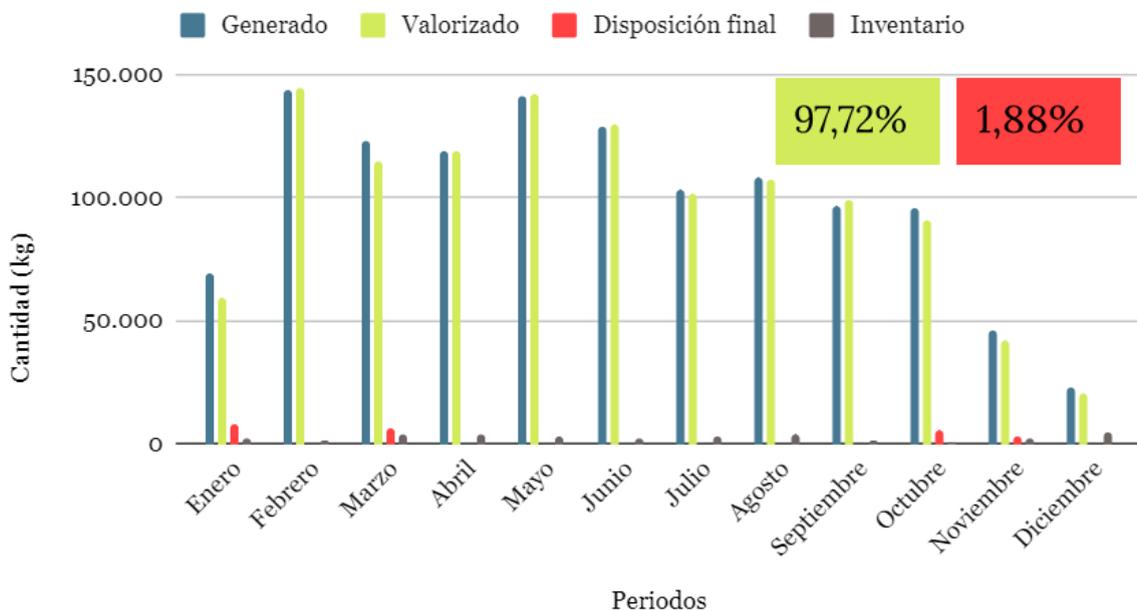


Figura 5.1.3 Gestión de escombros 2023 para el caso real, en que $N0_{ji_p} = 2.600$ para Cala y Brits. Fuente: Elaboración propia

Cabe comentar que este escenario es poco realista en la actualidad, ya que las capacidades de recepción de escombros en las obras suelen estar limitadas. Además, no pueden recibir escombros en todas las etapas de construcción, lo que hace improbable que puedan absorber una cantidad tan significativa.

En el tercer caso, se permite que la cantidad de escombros enviada a las obras Cala y Brits en cada viaje sea igual a la capacidad del camión para esa fracción. Los resultados se presentan en la Figura 5.4.1, donde se observa un comportamiento muy similar al caso anterior, pero se alcanza un porcentaje de valorización del 99,98%, destinando todo a la reutilización en obras. Lo demás queda en inventario, por lo que no hay escombros

destinados a disposición final ni a RCD. Además, el costo disminuye un 23% respecto al caso real y un 15% respecto al caso anterior.

Esto puede deberse a que los escombros son totalmente destinados a las obras, en las que el costo de recepción es nulo. Además, como en este caso los viajes pueden hacerse a capacidad completa, se reduce la cantidad de viajes necesarios respecto al caso anterior, lo que también disminuye los costos asociados a los fletes.

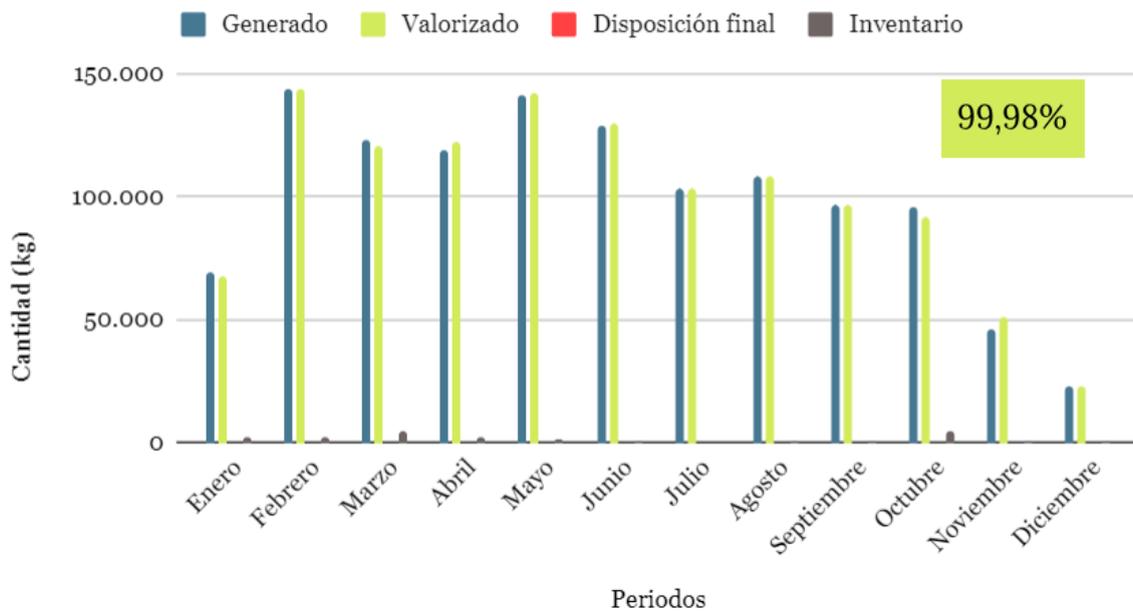


Figura 5.1.4 Gestión de escombros 2023 para el caso real, en que $NO_{j_i_p} = 5.430$ para Cala y Brits. Fuente: Elaboración propia

Los análisis presentados en los tres casos muestran cómo la gestión de escombros puede optimizarse al ajustar la capacidad de recepción de las obras. Algunos de los escenarios planteados muestran mejoras considerables en la valorización de escombros y reducción de costos. Aunque es importante señalar que estos resultados son poco realistas en el contexto actual, debido a las limitaciones prácticas en la recepción de escombros en obra durante las distintas etapas de construcción y a la falta de coordinación entre las obras.

5.2. Caso II: Costos de recepción

En el segundo análisis, se realizan variaciones en los costos de recepción del punto de disposición final Felipe Cardoso y del punto de revalorización Pedernal. El objetivo es estudiar cómo se gestionan los residuos cuando se modifican estos costos. Con este fin, se consideran tres escenarios distintos:

1. En el primer caso, se varía el parámetro cr_{jl} , aumentado el costo de Pedernal de forma de igualar al de Felipe Cardoso, y se observa la gestión de las fracciones de metal y cartón y papel en las obras Ventura y Domus.
2. En el segundo caso, se aumenta el valor cd_{jh} un 75% y se analiza su efecto en la gestión de todas las fracciones de las obras Ventura, Domus y More.
3. En el tercer caso, se aumenta el valor de cd_{jh} un 125% y se analiza su efecto en la gestión de todas las fracciones de las obras Ventura, Domus y More.

En el segundo y tercer escenario, además de las obras que se tomaron de referencia, se agrega More. Esta es la obra de mayor envergadura, por ende, la que genera más cantidad de residuos.

En el caso de estudio, enviar residuos a Pedernal es beneficioso para la empresa, ya que este punto paga por recibirlos, lo que se refleja en un valor negativo de cr_{jl} . Para el primer escenario, se aumenta este valor un 160% con el fin de igualar el costo de recepción de este destino con el de disposición final, Felipe Cardoso. Este análisis evalúa un posible escenario en el que Pedernal comience a cobrar por recibir residuos o se utilice otro punto de revalorización para enviar las fracciones metal y cartón y papel. El resultado que se obtiene es el mismo que en el caso de estudio para las dos obras estudiadas. A nivel de costos de recepción y traslado, enviar residuos a Felipe Cardoso o Pedernal es equivalente. Sin embargo, debido a la meta de valorización estipulada, es conveniente enviar todo lo generado para revalorizar. Los costos globales de este escenario no aumentan significativamente, solo un 3% en comparación con el caso real y esto se debe a los costos de recepción más elevados en Pedernal.

En el segundo escenario, el aumento del 75% en el costo de recepción de Felipe Cardoso lo convierte en el segundo destino más caro después de Uruplac, donde se revalorizan plásticos. Esto hace que valorizar escombros sea una opción más económica que disponerlos. En consecuencia, en las obras Ventura y More, que generan muchos escombros, no se envían a disposición final en ninguno de los períodos. Domus no presenta alteraciones en la gestión de escombros entre el caso real y el estudiado, en el que más del 70% de lo generado es valorizado. Aunque en este caso los costos globales aumentan un 20%, esto se debe principalmente a que todo el residuo clasificado como basura se envía a Felipe Cardoso. Este escenario podría reflejar una realidad futura, en la que aumentar el costo de enviar residuos a Felipe Cardoso fomente la valorización y mejor clasificación de basura, reduciendo la cantidad enviada a disposición final.

El tercer escenario es más extremo, en este caso el costo de recepción de Felipe Cardoso aumenta un 125%, convirtiéndolo en la opción más cara para enviar cualquier fracción. Como resultado, los residuos valorizables de las tres obras se llevan a los puntos de valorización correspondientes, sin enviar nada a disposición final. Asimismo, los costos totales aumentan un 30% en comparación con el caso real.

Estos análisis demuestran que modificar los costos de recepción puede fomentar una gestión de residuos más amigable con el medioambiente, penalizando económicamente a las empresas que envían residuos a disposición final.

5.3. Caso III: Capacidad de almacenamiento de las obras

En este caso se realizan variaciones en el valor del parámetro qm_{jit} . El objetivo es examinar qué sucede con la cantidad de viajes necesarios y la utilización de la capacidad de los camiones en esos viajes, al modificar la cantidad máxima de espacio de almacenamiento en obra para cada fracción.

Se toma como base el caso real y se analizan tres escenarios. En el primero, el valor del espacio de almacenamiento en las obras para todas las fracciones aumenta un 75% respecto al caso real. En el segundo escenario, el valor del espacio se incrementa en un 100% respecto al caso base. En el último caso, el valor de la cantidad máxima acumulada en obra se iguala al de la capacidad de un camión para las distintas fracciones. Las obras analizadas son Ventura y Domus, seleccionadas para el análisis de resultados por ser representativas de la empresa y contar con la mayor cantidad de datos disponibles.

Tabla 5.3.1 Viajes y uso de capacidad de camiones para gestión de escombros en Ventura y Domus considerando diferentes valores de qm . Fuente: elaboración propia

		Escombros			
		qm	Viajes	= 100%	$\geq 50\%$ y $< 100\%$
V e n t u r a	Caso real	49	34	10	5
	Aumenta 75%	49	34	10	5
	Aumenta 100%	49	33	11	5
	Igual a k_c	48	38	5	5
D o m u s	Caso real	16	5	9	2
	Aumenta 75%	16	5	9	2
	Aumenta 100%	16	5	9	2
	Igual a k_c	14	9	4	1

En la Tabla 5.3.1 se presentan los resultados obtenidos sobre los viajes necesarios para gestionar los escombros, tanto para el caso real como para los tres escenarios analizados en este estudio. En las primeras filas se analiza la gestión para Ventura y en las últimas para Domus. La primera columna muestra la variación del parámetro; la segunda columna indica la cantidad de viajes necesarios para gestionar los escombros;

en la tercera columna se detallan los viajes realizados a capacidad completa; en la cuarta columna se muestran los viajes realizados con una capacidad utilizada mayor al 50%; y en la quinta columna se especifica la cantidad de viajes realizados con una capacidad utilizada menor al 50%.

Se observa que cuando el espacio se incrementa en un 75% o un 100%, los resultados no muestran mejoras significativas. Esto podría deberse a que la cantidad establecida en el caso real era bastante baja, lo que limita el impacto de este aumento en la eficiencia del transporte de escombros.

Cuando la cantidad máxima de almacenamiento iguala la capacidad del camión, se observan mejoras en los resultados. En este caso, el espacio aumenta más del doble para Ventura y más de diez veces para Domus, lo que permite acumular una cantidad considerablemente mayor de escombros y realizar menos viajes con una mayor capacidad utilizada. Sin embargo, a pesar del aumento significativo en el espacio disponible, las mejoras en eficiencia no resultan tan significativas como se podría esperar.

En la Tabla 5.3.2 se presentan los resultados para la gestión de metal, de manera análoga al caso anterior. En este caso, los resultados no muestran variaciones significativas respecto al caso real. Esto puede atribuirse a las siguientes razones. Por un lado, las cantidades generadas de metal en obra son bajas y el espacio de almacenamiento en el caso real también es limitado, lo que dificulta llenar un camión completamente. Además, como la meta de valorización se debe cumplir en todos los períodos, si o si debe enviarse al menos un viaje a un punto de valorización.

Tabla 5.3.2 Viajes y uso de capacidad de camiones para gestión de metal en Ventura y Domus considerando diferentes valores de q_m . Fuente: elaboración propia

		Metal			
		q_m	Viajes	= 100%	≥ 50% y < 100 %
V e n t u r a	Caso real	15	0	5	10
	Aumenta 75%	15	0	5	10
	Aumenta 100%	15	0	5	10
	Igual a k_c	13	0	4	9
D o m u s	Caso real	9	0	0	9
	Aumenta 75%	9	0	0	9
	Aumenta 100%	9	0	0	9
	Igual a k_c	9	0	0	9

Por otro lado, en el caso del metal, cuando la cantidad a enviar alcanza los 1000 kg el flete es gratuito, lo que reduce la relevancia de llenar completamente el camión en términos de costos. Además, la cantidad de viajes realizados ya era baja en el caso real debido a la baja tasa de generación, lo que limita aún más la posibilidad de reducir los viajes.

En la Tabla 5.3.3 se presentan los resultados obtenidos para cartón y papel, de manera análoga a las fracciones analizadas anteriormente. En los dos primeros análisis no se observan variaciones respecto al caso real. Sin embargo, en el último caso, en el que el espacio de almacenamiento aumenta casi 10 veces para Ventura y 30 veces para Domus, se observa una disminución en la cantidad de viajes, aunque esta reducción no es proporcional al aumento del espacio disponible. De todas formas, para Ventura la mayoría de los viajes se realizan con la capacidad del camión completamente utilizada. En los viajes en los que no se alcanza esta capacidad esto se debe a la necesidad de cumplir en cada período con la meta de valorización. En el caso de Domus, debido a la menor cantidad generada de esta fracción y a la baja cantidad de viajes realizados inicialmente, las mejoras son apenas perceptibles.

Tabla 5.3.3 Viajes y uso de capacidad de camiones para gestión de cartón y papel en Ventura y Domus considerando diferentes valores de q_m . Fuente: elaboración propia

		Cartón y papel				
		q_m	Viajes	= 100%	$\geq 50\%$ y $< 100\%$	$< 50\%$
V e n t u r a	Caso real		19	8	6	5
	Aumenta 75%		19	8	6	5
	Aumenta 100%		19	8	6	5
	Igual a k_c		15	10	4	1
D o m u s	Caso real		14	3	3	8
	Aumenta 75%		14	3	3	8
	Aumenta 100%		14	3	3	8
	Igual a k_c		13	3	4	6

En la Tabla 5.3.4 se presentan los resultados sobre los viajes necesarios y la utilización de la capacidad de los camiones para la gestión de plásticos, de manera similar a las fracciones analizadas anteriormente. En este caso, se observan mejoras en los resultados cuando se aumenta la cantidad máxima de almacenamiento disponible. En el último caso, la cantidad de viajes necesarios disminuye y la mayoría se realiza con la capacidad del camión completamente utilizada. El mejor aprovechamiento de la capacidad de los camiones puede deberse a que la cantidad necesaria para llenar un camión con plásticos es menor en comparación con el resto de las fracciones.

Tabla 5.3.4 Viajes y uso de capacidad de camiones para gestión de plásticos en Ventura y Domus considerando diferentes valores de *qm*. Fuente: elaboración propia

		Plásticos			
		qm	Viajes	= 100%	≥ 50% y < 100 %
V e n t u r a	Caso real	24	8	16	0
	Aumenta 75%	24	10	12	2
	Aumenta 100%	23	11	10	2
	Igual a kc	21	15	5	1
D o m u s	Caso real	17	1	10	6
	Aumenta 75%	17	1	10	6
	Aumenta 100%	16	2	9	5
	Igual a kc	13	6	5	2

En la Tabla 5.3.5 se presentan los resultados obtenidos para la basura. En este caso, ya en el escenario real se logra una buena utilización de la capacidad de los camiones, por lo que los análisis realizados casi no presentan variaciones. Este hecho puede atribuirse a los siguientes factores: la alta cantidad de basura generada en obra, el considerable espacio de almacenamiento disponible en obra en comparación con otras fracciones y el hecho de que no exista una meta de valorización que condicione los viajes en este caso. Aunque la cantidad de viajes necesarios es elevada debido a la gran cantidad de basura generada, la capacidad de los camiones se utiliza casi en su totalidad.

Tabla 5.3.5 Viajes y uso de capacidad de camiones para gestión de basura en Ventura y Domus considerando diferentes valores de *qm*. Fuente: elaboración propia

		Basura			
		qm	Viajes	= 100%	≥ 50% y < 100 %
V e n t u r a	Caso real	74	71	3	0
	Aumenta 75%	74	71	2	1
	Aumenta 100%	74	71	2	1
	Igual a kc	74	71	2	1
D o m u s	Caso real	49	42	5	2
	Aumenta 75%	49	42	5	2
	Aumenta 100%	49	42	5	2
	Igual a kc	47	43	3	1

Por otro lado, no se observan variaciones significativas entre los costos obtenidos en los distintos casos que conforman este análisis y el valor correspondiente al caso real.

En resumen, se observa que ajustar la cantidad máxima de almacenamiento en obra tiene un impacto variable según la fracción considerada. De este modo, mientras algunas fracciones muestran mejoras al incrementar el espacio de almacenamiento, aunque no muy significativas, otras muestran cambios mínimos debido a condiciones como la cantidad generada y las metas de valorización que se deben cumplir en cada período. Además, los costos asociados no muestran fluctuaciones importantes en comparación con el escenario real.

5.4. Caso IV: Meta de valorización

En el cuarto análisis se realizan variaciones en el valor del parámetro G_{ij} , que representa las metas de valorización de las fracciones, para las obras Ventura, Domus y More. El fin es estudiar cómo se gestionan los residuos generados que se pueden enviar a los distintos destinos de valorización ante mayores y menores metas. Para ello, se seleccionan dos casos extremos y además se considera un escenario intermedio:

1. En el primer caso, se anula el valor de G_{ij} para estudiar la valorización de los residuos sin una meta establecida.
2. En el segundo se estudia el extremo opuesto, en el que el valor de G_{ij} es 100% para todos los residuos valorizables en las tres obras.
3. Por último, se estudia un caso intermedio en el que el valor de G_{ij} se aumenta un 50% sobre lo estipulado en el caso real.

En el primer escenario estudiado se obtienen resultados interesantes. Las fracciones de metal, cartón y papel se valorizaron en un 100% de lo generado, al igual que en el caso real, lo que era de esperarse debido al beneficio en los costos de llevar estos residuos a Pedernal. Por lo contrario, en ninguna de las tres obras se logra valorizar el plástico, es decir, todo lo generado se lleva a disposición final. En el caso de los escombros, aunque se valoriza una pequeña parte, el porcentaje es insignificante ya que más del 95% de los escombros de las tres obras se lleva a disposición final.

En el segundo escenario se valoriza el 100% de los residuos valorizables. Lo interesante es que, aunque es más caro valorizar todo lo que se genera, los costos globales solo aumentan un 5%. Esto muestra que la valorización completa no es tan costosa y contribuye positivamente a la sostenibilidad de la empresa y a la gestión ambiental.

El último escenario presenta una alternativa más realista respecto a los anteriores, con metas de valorización que varían entre un 45% y un 75% de los residuos en las obras.

A continuación, se presenta la Tabla 5.4.1, que compara los porcentajes de valorización de residuos del caso real con los del último escenario de este análisis. Las primeras cinco filas corresponden a los datos y resultados del caso real y las últimas cinco al análisis actual. En la primera columna se enumeran las tres obras estudiadas y en la segunda, las metas de valorización para cada una de estas. En las siguientes columnas se presentan los porcentajes obtenidos de valorización para cada uno de los residuos valorizables.

Tabla 5.4.1 Comparación porcentajes de valorización del caso de estudio en Ventura, Domus y More vs el análisis de sensibilidad. Fuente: elaboración propia

Valorización Caso de Estudio					
OBRAS	Meta	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos
Ventura	50%	52%	100%	100%	59%
Domus	45%	71%	100%	100%	59%
More	30%	35%	100%	100%	37%
Valorización Análisis de sensibilidad					
OBRAS	Meta	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos
Ventura	75%	81%	100%	100%	97%
Domus	67,5%	89%	100%	100%	81%
More	45%	48%	100%	100%	49%

Como era de esperarse, la valorización del metal, cartón y papel sigue siendo del 100%. Luego, para cumplir mensualmente con la meta de valorización de los otros residuos, resulta conveniente llenar los camiones a su capacidad máxima y llevar el excedente a disposición final. Esto se debe a que algunos camiones, si solo transportaran la cantidad exacta requerida para cumplir con la meta establecida, no irían completamente llenos. Por lo tanto, se maximiza la carga de los camiones y se lleva a Felipe Cardoso el sobrante, ya que es más económico que seguir valorizando. En algunos períodos, se deja un bajo porcentaje de escombros o plástico en las obras, pero dado el límite de espacio son pocos estos casos.

Es interesante destacar lo que sucede con los costos globales en estos tres casos. En el primero, disminuyen solo un 5%, lo que indica que es factible establecer metas de valorización. En el segundo, es levemente más caro valorizar todo, con un aumento del 5% en los costos. En el tercero, el aumento es aproximadamente de un 2%. Esto sugiere que se pueden considerar escenarios donde la meta de valorización de residuos crezca y los costos no se incrementen de manera significativa. Los resultados obtenidos en los tres casos muestran la importancia de establecer metas de valorización que incentiven a las empresas a valorizar residuos, promoviendo una industria más amigable con el medioambiente y con la economía circular.

5.5.Caso V: Composición de los residuos generados

Según los datos relevados, la basura es una de las fracciones más generada en las obras de construcción. Cabe destacar que está compuesta por residuos que no se pueden valorizar, pero también incluye mezclas de otras fracciones que sí podrían valorizarse si se clasificaran adecuadamente. Por esta razón, resulta relevante analizar el impacto de una mejor clasificación de residuos y, en consecuencia, la reducción de la cantidad de basura generada. Para ello, se consideran dos casos y se prueban en las obras Ventura y Domus. La primera es una obra de mayor tamaño, mientras que la segunda es más pequeña, lo que permite representar adecuadamente diferentes escenarios.

En primer lugar, es interesante destacar los resultados obtenidos en el caso real sobre la valorización y disposición final de residuos para estas obras. En el caso de Ventura, la basura representa el 46% de los residuos generados. Al observar la gestión total de los residuos, se valoriza solo el 29,3%, mientras que el 67% se destina a disposición final y el resto queda en inventario, como se muestra en la Figura 5.5.1. Además, de los residuos con potencial de valorización, se valoriza el 56%, tanto en puntos de revalorización como mediante la reutilización en obra.

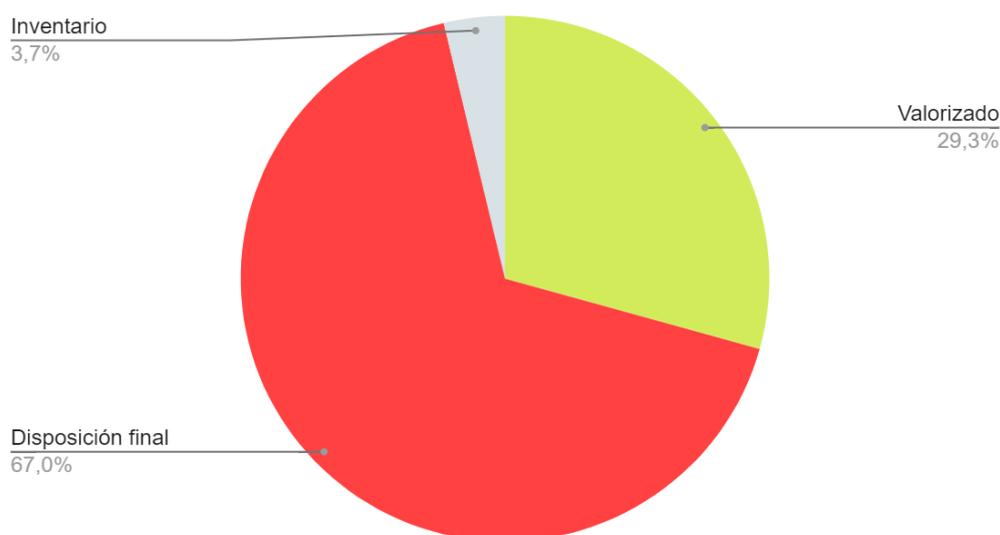


Figura 5.5.1 Gestión de residuos en Ventura 2023 según los resultados obtenidos para el caso real. Fuente: Elaboración propia

En Domus, la basura es el residuo más generado, representando el 64% de la composición total. En cuanto a la gestión global de los residuos, se valoriza el 25,9%, mientras que el 73,7% se destina a disposición final y el resto queda en inventario, como se observa en la Figura 5.5.2. Además, el 72% de los residuos con potencial de valorización son efectivamente valorizados.

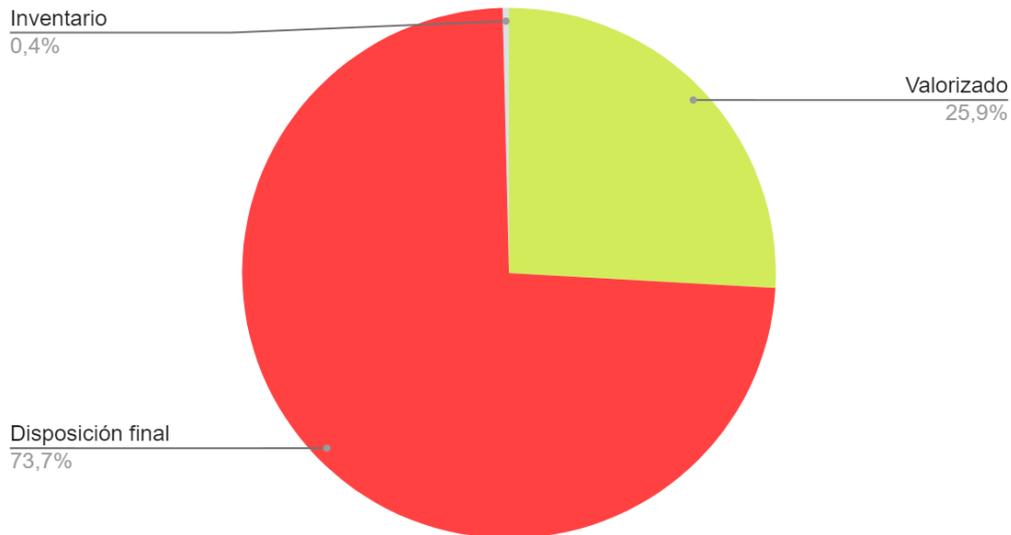


Figura 5.5.2 Gestión de residuos en Domus 2023 según los resultados obtenidos para el caso real. Fuente: Elaboración propia

Considerando los resultados obtenidos para el escenario real, el primer caso a analizar consiste en reducir al 50% la cantidad de basura generada en ambas obras. La otra mitad se redistribuye entre las demás fracciones de residuos, de manera proporcional a la generación de cada una de ellas. La composición resultante de los residuos para este caso se presenta en la Figura 5.5.3. A la izquierda, se muestra la composición de los residuos para Ventura y a la derecha, la composición para Domus.

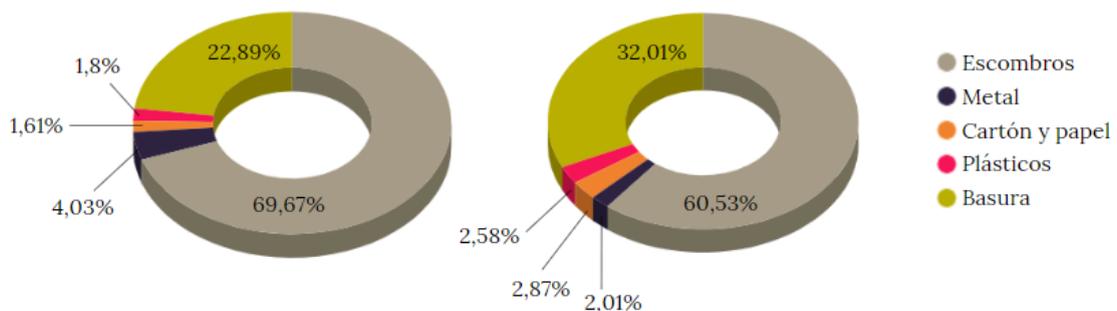


Figura 5.5.3 Composición de los residuos generados en kg en Ventura (izquierda) y Domus (derecha) en 2023 para el primer caso de análisis. Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 5.5.4 y 5.5.5 se presentan los resultados de la gestión de residuos en Ventura y Domus, respectivamente, según este primer análisis. En ambos casos, se observa un incremento en el porcentaje de residuos valorizados en comparación con el escenario real. Para Ventura, el porcentaje de residuos valorizados aumenta del 29,3% al 55,8%, lo que reduce el porcentaje de residuos destinados a disposición final del 67% al 43,4%. De manera similar, en Domus el porcentaje de residuos valorizados crece del 25,9% al 40,9%, disminuyendo así la cantidad de residuos destinados a disposición final

del 73,7% al 59,1%. Estos resultados pueden deberse a la reducción en la cantidad de basura, lo que incrementa la proporción de residuos de otras fracciones con potencial de valorización.

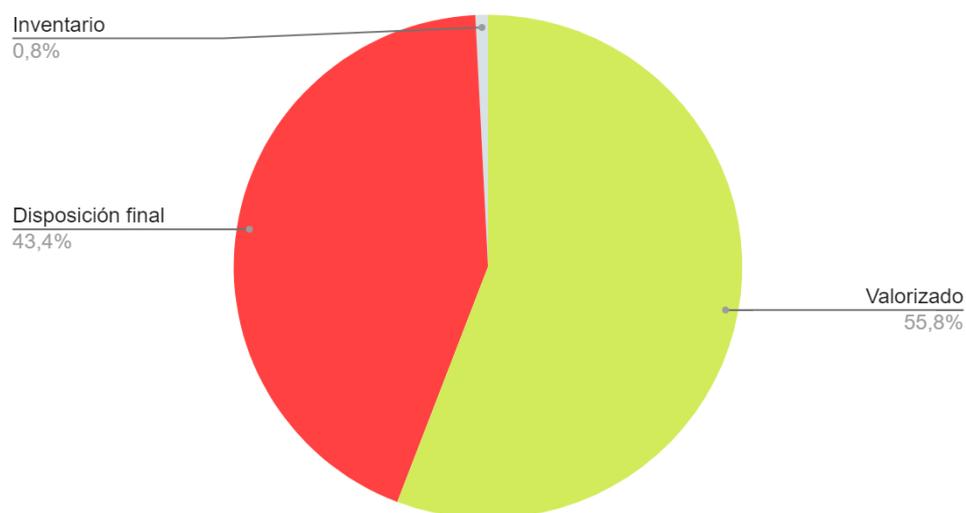


Figura 5.5.4 Gestión de residuos en Ventura 2023 según los resultados obtenidos para el primer caso de análisis. Fuente: Elaboración propia

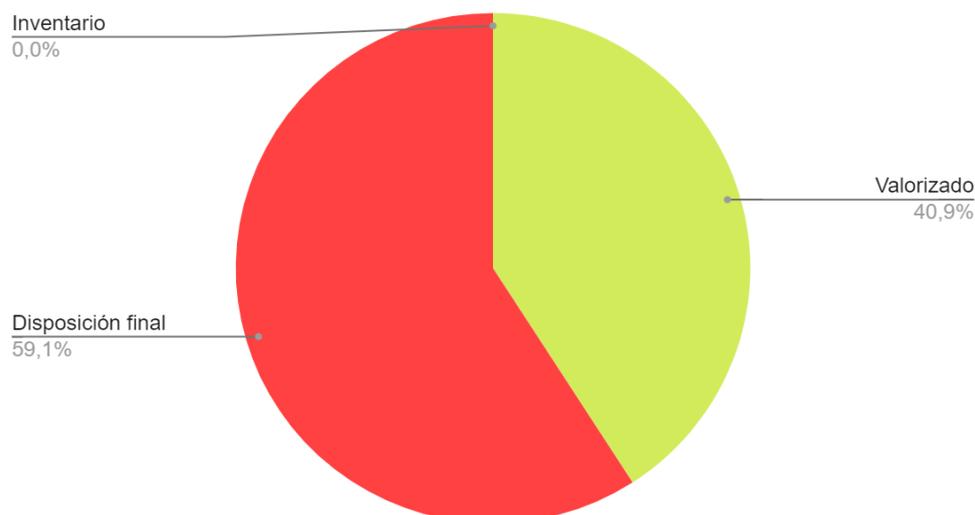


Figura 5.5.5 Gestión de residuos en Domus 2023 según los resultados obtenidos para el primer caso de análisis. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo al analizar los residuos valorizados, se observa que en Ventura el porcentaje de residuos valorizables que efectivamente se valorizan se mantiene en el 56%. Aunque aumenta la cantidad de residuos valorizados, debido a una mayor cantidad de residuos valorizables, no se registran mejoras en la proporción de residuos valorizados respecto al escenario anterior, manteniéndose constantes los porcentajes de valorización para todas las fracciones.

En Domus, el porcentaje de residuos valorizables que se valorizan baja del 72% al 60%. Esto se debe a que, aunque los porcentajes de valorización para metal, plástico y cartón y papel casi no varían, el porcentaje de valorización de escombros disminuye del 71% al 57% respecto al escenario real. Esto ocurre porque hay una mayor cantidad de escombros para gestionar y el precio del punto de revalorización de escombros es mayor que el del punto de disposición final. Por lo tanto, aunque se cumple la meta de valorización en todos los períodos, también se destina una mayor cantidad de escombros a disposición final.

El segundo caso a analizar implica reducir la cantidad de basura generada en ambas obras, dejando solo un 20% de la basura original en cada una de ellas. El 80% restante se redistribuye proporcionalmente entre las demás fracciones de residuos, de acuerdo con su generación. En la Figura 5.5.6 se muestra la composición de los residuos resultantes, con Ventura en el gráfico de la izquierda y Domus en el de la derecha.

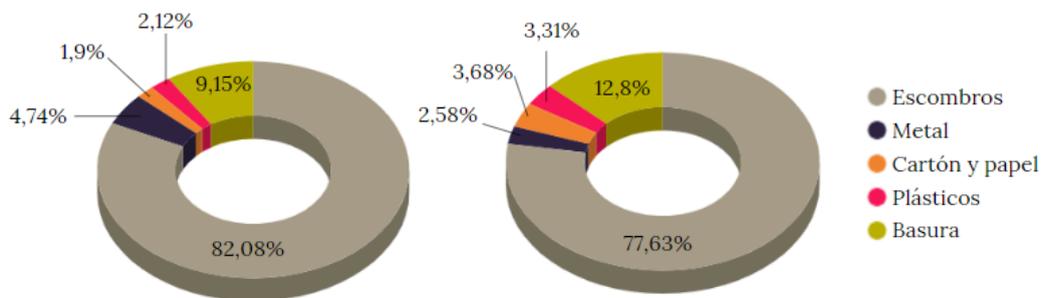


Figura 5.5.6 Composición de los residuos generados en kg en Ventura (izquierda) y Domus (derecha) en 2023 para el segundo caso de análisis. Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 5.5.7 y 5.5.8 se presentan los resultados de la gestión de residuos en Ventura y Domus, respectivamente, para este segundo análisis. En ambos casos, se observa un incremento en el porcentaje de residuos valorizados en comparación con el escenario real. En Ventura, el porcentaje de residuos valorizados aumenta del 29,3% al 50,4%, reduciendo el porcentaje de residuos destinados a disposición final del 67% al 48,8%. De manera similar, en Domus el porcentaje de residuos valorizados se incrementa del 25,9% al 49,3%, lo que disminuye la cantidad de residuos destinados a disposición final del 73,7% al 50,7%. Al igual que en el primer análisis, estos resultados pueden atribuirse a la reducción de la cantidad de basura y el incremento de las fracciones con potencial de valorización.

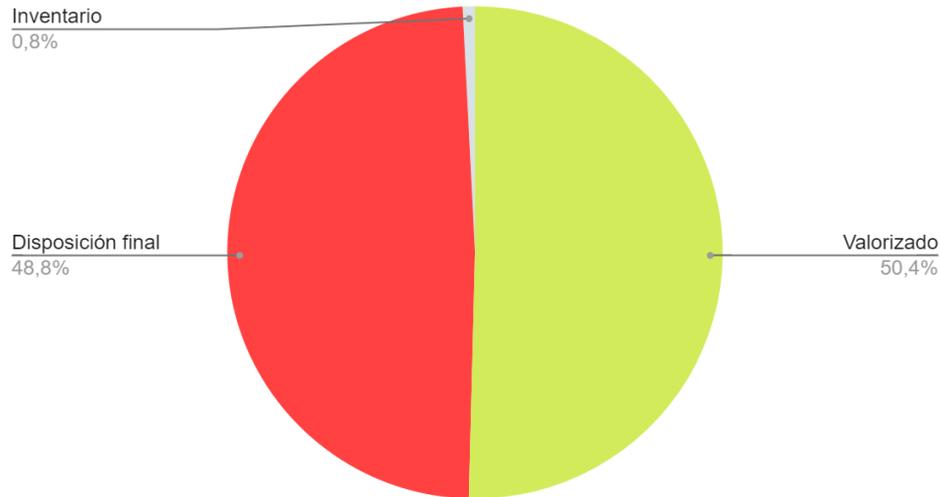


Figura 5.5.7 Gestión de residuos en Ventura 2023 según los resultados obtenidos para el segundo caso de análisis. Fuente: Elaboración propia

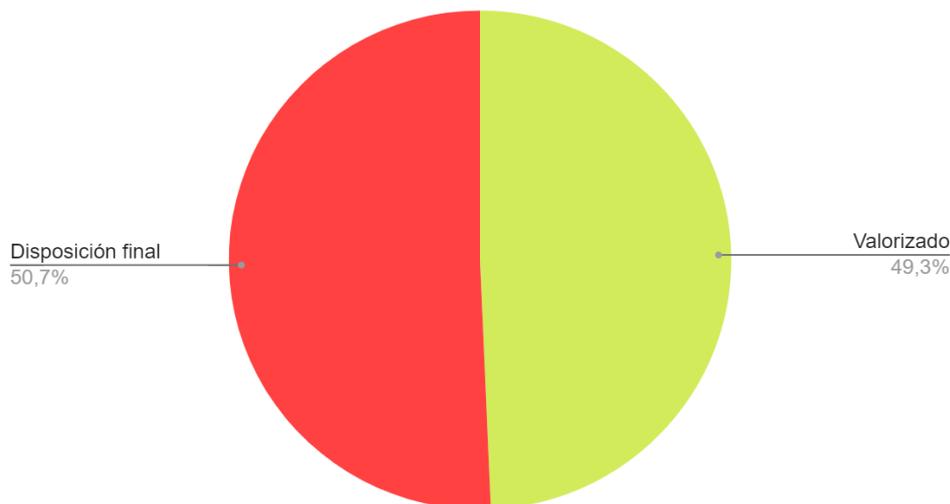


Figura 5.5.8 Gestión de residuos en Domus 2023 según los resultados obtenidos para el segundo caso de análisis. Fuente: Elaboración propia

En este caso, aunque las cantidades valorizadas mejoran para ambas obras, se reduce el porcentaje de residuos valorizables que efectivamente se valorizan respecto al escenario real y al primer análisis. En Ventura, este porcentaje disminuye al 50% debido a la reducción en la valorización de plásticos. El punto de revalorización para esta fracción tiene el mayor costo de recepción, lo que lleva a enviar una mayor cantidad a disposición final.

En Domus, el porcentaje de residuos con potencial de valorización que efectivamente se valorizan baja al 57%, comparado con el 72% del escenario real y el 60% del primer análisis. Esto se debe a que la valorización de escombros cae del 70% al 53%, y la de plásticos del 59% al 53%. En ambos casos, la disminución puede estar asociada a los

mayores costos de recepción en los puntos de revalorización para estas fracciones, en comparación con el costo de disposición final. Aunque aumenta la cantidad potencial a valorizar y más residuos se valorizan, el porcentaje de valorización efectivo disminuye debido a los costos más altos.

Los costos para la gestión de residuos en el primer y segundo análisis muestran una ligera disminución respecto al escenario real. Esto podría explicar la reducción en los porcentajes de valorización para escombros y plásticos, fracciones cuyos puntos de revalorización tienen costos de recepción más elevados en comparación con el punto de disposición final. Además, la cantidad valorizada de metal, cartón y papel también aumenta, y los puntos de revalorización de estas fracciones pagan por recibir estos residuos. A su vez, aumentar la cantidad generada de las fracciones que antes tenían baja generación, puede contribuir a que los viajes se realicen con un mejor aprovechamiento de la capacidad. Asimismo, la reducción en la cantidad de basura conlleva a una disminución en los costos asociados a su gestión.

En resumen, los análisis realizados muestran que reducir la cantidad de basura genera beneficios en la gestión global de residuos para Ventura y Domus, con un aumento en la cantidad de residuos valorizados y una pequeña disminución en el costo total. Aunque se generan desafíos como la reducción en los porcentajes de valorización para escombros y plásticos, debido a costos más altos en puntos de revalorización, se observa un aumento en la valorización de metal, cartón y papel.

6. Conclusiones y trabajo futuro

En el proyecto de grado que se presenta en este informe, se abordó un problema relacionado con la gestión de residuos de obras civiles.

Primero se realizó una revisión bibliográfica mediante la que se identificaron puntos críticos de la gestión de RCD, motivando al equipo a trabajar en este campo. Se analizaron más de cuarenta documentos de los últimos diez años, incluyendo bibliografía específica de Uruguay. Luego, se abordó el problema en CEAOSA, empresa constructora de obras civiles arquitectónicas, en la que la gestión de residuos ha cobrado protagonismo en los últimos años de su operativa.

La revisión de la literatura realizada destaca los desafíos y tendencias globales en la gestión de RCD, subrayando la importancia de un enfoque integral y la necesidad de minimizar la generación de residuos. Se identificaron prácticas específicas en cada etapa del proceso de construcción, desde el diseño hasta la demolición, con énfasis en la planificación, la gestión in situ y la coordinación efectiva. En Uruguay, aunque hay avances normativos, persisten desafíos en su implementación y supervisión. Además, se resalta como un aspecto clave promover una cultura de circularidad en los planes de gestión ambiental.

CEAOSA, empresa constructora del caso de estudio del proyecto, se encuentra implementando un plan de gestión de residuos en algunas de sus obras, aunque de forma no coordinada, con períodos de acumulación de residuos, lo que ocupa espacio y entorpece tareas. Para abordar este problema se desarrolló un modelo matemático que considera esta realidad y busca coordinar dicha gestión entre las distintas obras, con el objetivo de minimizar costos y, a su vez, lograr porcentajes altos de valorización de residuos mediante reciclaje o reutilización.

El modelo fue validado mediante pruebas de validación y test de carga. Luego, se definió para el caso de estudio una planificación de gestión de residuos en un horizonte de un año, abarcando ocho obras y considerando cinco fracciones de residuos: escombros, metal, cartón y papel, plástico y basura. Estos residuos pueden ser enviados a distintos destinos, teniendo en cuenta las metas definidas de valorización, las capacidades de los camiones para cada fracción y los costos asociados tanto al viaje como a la recepción en los puntos de destino. Estos puntos incluyen la disposición final, los puntos de revalorización específicos para cada tipo de residuo y, en el caso de los escombros, la opción de llevarlos a otra obra que los necesite.

La solución obtenida a través del modelo revela información pertinente para la empresa. Se obtuvo una solución para la gestión de RCD que minimiza costos y alcanza la valorización total de metales, cartón y papel. Respecto a los porcentajes de valorización de escombros y plásticos obtenidos, si bien cumplen con las metas establecidas, podrían

mejorarse. La significativa generación de basura, sin opciones de valorización, resalta la necesidad de estrategias adicionales para reducir su impacto en la gestión global de residuos.

Los análisis de sensibilidad realizados permitieron observar cómo varía la solución frente a posibles escenarios y extraer información relevante. De este modo, los casos estudiados mostraron que la modificación de los costos de recepción puede incentivar una gestión de residuos más sostenible, desestimulando a las empresas que disponen de residuos de forma no amigable con el medioambiente. A su vez, una clasificación más eficiente de la basura repercute en mejores porcentajes globales de valorización. Por otro lado, ajustar el espacio de almacenamiento en obra tiene un impacto variable dependiendo de la fracción de residuos, pero sin causar fluctuaciones significativas en los costos. Por último, establecer metas de valorización es crucial para fomentar que las empresas valoricen residuos, promoviendo así el desarrollo de una economía circular.

Como trabajo futuro, se identifican posibles mejoras en el modelo. En primer lugar, se sugiere considerar el inicio y fin de las obras, así como las distintas etapas de la construcción, para lograr una mejor gestión de escombros y residuos que se puedan reutilizar en otras obras. Además, se podría utilizar aquellas que están comenzando como puntos intermedios de acumulación para optimizar el manejo de residuos.

Por otro lado, agregar ruteo al modelo podría favorecer la coordinación de viajes entre las obras y reducir la emisión de carbono de los camiones, para seguir contribuyendo a una mejor gestión ambiental. En cuanto a las metas de valorización, en vez de exigir que se cumplan en todos los períodos, sería conveniente que lo logren considerando todo el ciclo de construcción de una obra. Esto podría generar estrategias con más libertad a la hora de planificar los viajes, optimizando el uso de los camiones y el espacio de almacenamiento en obra, favoreciendo a la toma de decisiones según las características y necesidades de cada proyecto de construcción. A su vez, podría ser interesante incorporar la gestión de otras fracciones como vidrio y madera, y la forma en que estas pueden ser valorizadas.

Finalmente, los costos asociados a la gestión interna de los residuos no se tuvieron en cuenta en este proyecto y podría ser beneficioso considerarlos –por ejemplo, horas persona para ordenar y clasificar residuos–.

Se recomienda reducir la cantidad de residuos generados mediante estrategias en la etapa de diseño. Además, lograr una mejor clasificación de las distintas fracciones podría ayudar a disminuir la cantidad de basura generada. Es crucial que la empresa fomente una concientización sobre la sostenibilidad y la gestión ambiental en todas sus áreas, destacando la importancia de un enfoque integral y colaborativo para enfrentar los desafíos de la gestión de residuos en sus obras.

La gestión de RCD en la construcción es una responsabilidad ambiental fundamental. Una gestión eficiente es crucial para optimizar costos y contribuir a la sostenibilidad. Este proyecto buscó subrayar la importancia de minimizar la generación de residuos y maximizar su valorización, promoviendo prácticas sostenibles. Se concluye entonces que se elaboró una herramienta de apoyo para la toma de decisiones de la empresa. A su vez, se logró un modelo lo suficientemente genérico, que puede adaptarse a la realidad de otra empresa constructora local que busque incorporar estrategias para la gestión de sus residuos. En esta línea, la implementación de planes de gestión de residuos en las empresas constructoras, previos y posteriores a su generación, así como el apoyo gubernamental a través de regulaciones efectivas, son fundamentales para definir las estrategias. También, conceptos como LCA y la jerarquía de las 3R pueden ser los puntos de partida para su definición.

El desarrollo del proyecto permitió reafirmar conceptos estudiados durante la carrera, especialmente en relación con problemas de optimización abordados mediante modelado matemático. A su vez, la revisión bibliográfica realizada permitió investigar sobre aspectos ambientales y prácticas innovadoras a nivel global. Se destacan la optimización y la programación lineal como herramientas que pueden contribuir a la resolución de desafíos complejos, como es el caso de la planificación en la gestión de residuos de obras civiles. Estos desafíos implican reducir los impactos ambientales, problema que involucra a toda la sociedad y debe orientar a las generaciones futuras hacia buenas prácticas de sostenibilidad.

Referencias

- Ajayi, S., Oyedele, L., Akinade, O., Bilal, M., Alaka, H., Owolabi, H. (2017). Optimising material procurement for construction waste minimization: An exploration of success factors. *Sustainable Materials and Technologies* 11, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.001>
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Arawomo, O. O. (2018). Designing out construction waste using BIM technology: Stakeholders' expectations for industry deployment. *Journal of Cleaner Production* 180, 375-385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.022>
- Aslam, M. S., Huang, B., Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management* 264, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>
- Bao, Z., Lu, W. (2021). A decision-support framework for planning construction waste recycling: A case study of Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production* 309, 127449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127449>
- Bi, W., Lu, W., Zhao, Z., Webster, C. J. (2022). Combinatorial optimization of construction waste collection and transportation: A case study of Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling* 179, 106043. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106043>
- Bizcocho, N., Llatas, C. (2019). Inclusion of prevention scenarios in LCA of construction waste management. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24, 468-484. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1462-8>
- Button, A., Lee, W., Marshall, D., Dawood, Z., MacLellan, S., Umali, H., Pagsuyoin, S. (2014). Management of construction and demolition waste in the Region of Waterloo. En: *2014 Systems and Information Engineering Design Symposium* (pp. 53-56).
- Chen, J., Lu, W., Xue, F. (2021). "Looking beneath the surface": A visual-physical feature hybrid approach for unattended gauging of construction waste composition. *Journal of Environmental Management* 286, 112233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112233>
- Chen, X., Lu, W., Liao, S. (2016). A Framework of Developing a Big Data Platform for Construction Waste Management: A Hong Kong Study. En: *Proceedings of the*

20th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate (pp. 1069-1076).

- Daoud, A. O., Othman, A. A. E., Ebohon, O. J., Bayyati, A. (2021). Quantifying materials waste in the Egyptian construction industry: A critical analysis of rates and factors. *Ain Shams Engineering Journal* 12, 4275-4289. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.039>
- Davis, P., Aziz, F., Newaz, M. T., Sher, W., Simon, L. (2021). The classification of construction waste material using a deep convolutional neural network. *Automation in Construction* 122, 103481. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103481>
- Doussoulina, J. P., Bittencourt, M. (2021). How effective is the construction sector in promoting the circular economy in Brazil and France?: A waste input-output analysis. *Structural Change and Economic Dynamics* 60, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2021.10.009>
- Esguícero, F. J., Deus, R. M., Battistelle, R., Martins, B. L., Bezerra, B. S. (2021). Construction and demolition waste management process modeling: a framework for the Brazilian context. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 23, 2037-2050. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01247-y>
- Gan, V., Cheng, J. (2015). Formulation and analysis of dynamic supply chain of backfill in construction waste management using agent-based modeling. *Advanced Engineering Informatics* 29, 878-888. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.004>
- Ge, X. J., Livesey, P., Wang, J., Huang, S., He, X., Zhang, C. (2017). Deconstruction waste management through 3d reconstruction and bim: a case study. *Visualization in Engineering* 5(13). <https://doi.org/10.1186/s40327-017-0050-5>
- Ghaffar, S. H., Burman, M., Braimah, N. (2020). Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of Cleaner Production* 244, 118710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118710>
- Guerra, B. C., Leite, F., Faust, K. M. (2020). 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams. *Waste Management* 116, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.035>
- Ismail, E. R., El-Mahdy, G. M., Ibrahim, A. H., Daoud, A. O. (2023). Analysis of factors affecting construction and demolition waste safe disposal in Egypt. *Alexandria Engineering Journal* 70, 515-523. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.012>

- Janani, R., Ilango, T., Meenakshi, E., Rajesh Kumar, J. (2022). Minimization of construction waste in Chennai construction industry. *Materialstoday: proceedings* 52, 1884-1890. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.515>
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., Tam, V. W. Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production* 263, 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
- Kang, K., Besklubova, S., Dai, Y., Zhong, R. Y. (2022). Building demolition waste management through smart BIM: A case study in Hong Kong. *Waste Management* 143, 69-83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.027>
- Kucukvar, M., Egilmez, G., Tatari, O. (2016). Life Cycle Assessment and Optimization-Based Decision Analysis of Construction Waste Recycling for a LEED-Certified University Building. *Sustainability* 8(1), 89. <https://doi.org/10.3390/su8010089>
- Laovisutthichai , V., Lu, W., Bao, Z. (2020). Design for construction waste minimization: guidelines and practice. *Architectural Engineering and Design Management* 18(3), 279-298. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1862043>
- Li, C. Z., Zhao, Y., Xiao, B., Yu, B., Tam, V., Chen, Z., Ya, Y. (2020). Research trend of the application of information technologies in construction and demolition waste management. *Journal of Cleaner Production* 263, 121458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121458>
- Li, Y., Li, M., Sang, P. (2022). A bibliometric review of studies on construction and demolition waste management by using CiteSpace. *Energy and Buildings* 258, 111822. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111822>
- Liu, Z., Wu, T., Wang, F., Osmani, M., Demian, P. (2022). Blockchain Enhanced Construction Waste Information Management: A Conceptual Framework. *Sustainability* 14(19), 12145. <https://doi.org/10.3390/su141912145>
- Lu, W., Chen, J., Xue, F. (2022). Using computer vision to recognize composition of construction waste mixtures: A semantic segmentation approach. *Resources, Conservation and Recycling* 178, 106022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106022>
- Lu, W., Webster, C., Chen, K., Zhang, X., Chen, X. (2017). Computational Building Information Modelling for construction waste management: Moving from

rhetoric to reality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 587-595.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.029>

Marzouk, M., Azab, S. (2013). Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling* 82, 41-49.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015>

Ministerio de Ambiente. (2021). *Uruguay + Circular: Plan Nacional de Gestión de Residuos 2022 - 2032*. Recuperado el 21 de agosto de 2023 de <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/PNGR-general.pdf>

Pessio, A. (26 de mayo de 2021). *Obras en Montevideo deberán contar con un sistema de gestión de residuos*. Intendencia de Montevideo. Recuperado el 17 de agosto de 2023 de <https://montevideo.gub.uy/noticias/medio-ambiente-y-sostenibilidad/obras-en-montevideo-deberan-contar-con-un-sistema-de-gestion-de-residuos>

Reacción (2021). *Diagnóstico de Circularidad del Sector Construcción (V 1.0)*. Cámara de la Construcción del Uruguay.

Roda, C., Pigola, P. (2021). *De residuos a recursos: Residuos de construcción y demolición en Montevideo*. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el 18 de agosto de 2023 de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-residuos-a-recursos-residuos-de-construccion-y-demolicion-en-Montevideo.pdf>

Sepasgozar, S., Mair, D., Tahmasebinia, F., Shirowzhan, S., Li, H., Richter, A., Yang, L., Xu, S. (2021). Waste management and possible directions of utilising digital technologies in the construction context. *Journal of Cleaner Production* 324, 129095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129095>

Sharma, N., Kalbar, P. P., Salman, M. (2022). Global review of circular economy and life cycle thinking in building Demolition Waste Management: A way ahead for India. *Building and Environment* 222, 109413.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109413>

Tafesse, S., Girma, Y. E., Dessalegn, E. (2022) Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices. *Heliyon* 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09169>

- Wang, J., Li, Z., Tam, V. (2015). Identifying best design strategies for construction waste minimization. *Journal of Cleaner Production* 92, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.076>
- Wang, J., Wu, H., Tam, V. W. Y., Zuo, J. (2019a). Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production* 206, 1004-1014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.170>
- Wang, T., Wu, Z., Luo, C. (2021). Multi-participant construction waste demolition and transportation decision-making system. *Resources, Conservation and Recycling* 170, 105575. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105575>
- Wang, Z., Heng Li, H., Zhang, X. (2019b). Construction waste recycling robot for nails and screws: Computer vision technology and neural network approach. *Automation in Construction* 97, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.009>
- Won, J., Cheng, J. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. *Automation in Construction* 79, 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.002>
- Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M. S., Eskicioglu, C., Sadiq, R. (2013). An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Techn Environ Policy* 15, 81-91. <https://doi-org.proxy.timbo.org.uy/10.1007/s10098-012-0481-6>
- Yu, S., Awasthi, A. K., Ma, W., Wen, M., Di Sarno, L., Wen, C., Hao, J. L. (2022). In support of circular economy to evaluate the effects of policies of construction and demolition waste management in three key cities in Yangtze River Delta. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 26, 100625. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100625>
- Yuan, H., Lu, W., Hao, J. J. (2013). The evolution of construction waste sorting on-site. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20, 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.012>
- Zhou, L., Zhao Y., Yin, H. Y. (2014). Construction Waste Recycling Research from the Perspective of Ecological Industrial Engineering. *Applied Mechanics and Materials* 644-650, 5395-5398. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5395>

Apéndice I

Estado del arte



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Desafíos y tendencias en la gestión de Residuos de Construcción y Demolición

Estado del arte

Proyecto de grado - Ingeniería de Producción

Autores:

Carmela González Rodríguez
María Celina O'Neill Maisonnave

Tutor:

Pedro Piñeyro

Índice

Glosario de siglas.....	3
1. Introducción.....	4
2. Conceptos claves.....	5
2.1 Residuos de Construcción y Demolición.....	5
2.2 Etapas de una edificación.....	5
2.3 Disposición final.....	6
2.4 Building Information Modeling (BIM).....	6
2.5 Economía Circular y Jerarquía 3R.....	7
3. Situación actual en Uruguay.....	9
4. Revisión sistemática de la literatura.....	14
4.1 Metodología.....	14
4.2 Análisis estadístico.....	18
4.3 Revisión de los documentos por categoría.....	20
4.3.1 Etapa de diseño.....	21
4.3.2 Etapa de construcción y uso.....	24
4.3.3 Etapa de demolición.....	31
4.3.4 Varias etapas.....	36
4.3.5 Ciclo de vida.....	41
5. Conclusiones.....	52
Referencias.....	55

Glosario de siglas

BIM: Modelado de información de construcción (Building Information Modeling)

C&D: Construcción y Demolición

CCU: Cámara de la Construcción del Uruguay

EC: Economía circular

GEI: Gases de Efecto Invernadero

IM: Intendencia de Montevideo

IoT: Internet de las cosas (Internet of things)

LCA: Análisis del ciclo de vida (Life Cycle Assessment)

MA: Ministerio de Ambiente

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

1. Introducción

La gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) se ha convertido en uno de los desafíos más urgentes a nivel global (Kabirifar et al., 2020). El presente documento ofrece una revisión del estado actual de este problema, abordando las principales prácticas en la industria de la construcción y los principales problemas que enfrenta la gestión de estos residuos tanto a nivel nacional como internacional. A lo largo de la investigación, se analizaron más de cuarenta documentos relacionados con la temática, abarcando el período comprendido entre 2013 y 2023. Se utilizaron las colecciones internacionales Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore y Springer Link, así como bibliografía específica para el contexto uruguayo.

Los resultados revelan un creciente interés de la comunidad académica en la gestión de RCD tanto a nivel global como en el ámbito nacional. Aunque se identifican avances significativos, persisten retos sustanciales en la implementación de prácticas sostenibles a lo largo del ciclo de vida de los residuos.

En este documento se proporciona una revisión de los hallazgos y se destaca la necesidad de abordar integralmente la gestión de RCD, con un énfasis particular en la fase de diseño, la reutilización de componentes y la adopción de tecnologías avanzadas. Las conclusiones subrayan la importancia de fortalecer regulaciones, incluir métodos de optimización, promover la colaboración entre distintos actores y fomentar un cambio cultural en la industria de la construcción y la sociedad en general, hacia un enfoque más sostenible y responsable en la gestión de los RCD. Esta perspectiva no solo contribuirá a la preservación del medioambiente, sino que también abrirá nuevas oportunidades económicas en el sector de la construcción.

La estructura del documento se divide en las siguientes secciones. En la [Sección 2](#) se presentan algunos conceptos claves. La [Sección 3](#) incluye la situación actual en Uruguay sobre la gestión de RCD. La [Sección 4](#) detalla la revisión sistemática de la literatura vinculada a la temática y se presenta un análisis crítico de los documentos seleccionados. Finalmente, la [Sección 5](#) incluye conclusiones finales y recomendaciones para futuras investigaciones.

2. Conceptos claves

A continuación se definen algunos conceptos claves, que serán de vital utilidad para comprender el documento.

2.1 Residuos de Construcción y Demolición

Los residuos de construcción se definen como los desechos provenientes de la construcción, renovación y reparación de estructuras edilicias. Por otro lado, los residuos de demolición surgen como desechos de estructuras derribadas (Kabirifar et al., 2020).

La construcción y la deconstrucción difieren en términos de proceso y generación de residuos (Ge et al., 2017). Los residuos de construcción pueden provenir de la excavación, de materiales para la planificación y mantenimiento de estructuras y también pueden generarse a partir de todos los materiales utilizados en operaciones o construcción en el lugar de trabajo, reparaciones, apuntalamiento, acumulación, expansión o actividades de renovación. Por otra parte, los residuos de deconstrucción están constituidos por los escombros de la demolición estructural y no estructural de un edificio. La característica principal de la deconstrucción es que puede haber materiales peligrosos, como residuos de amianto (Ge et al., 2017).

También se definen los RCD como residuos sólidos generados en el proceso de construcción, mantenimiento y demolición de edificios o estructuras (Li et al., 2022). Estos residuos se generan debido a la falta de conformidad con las especificaciones, la falta de uso o el uso excesivo de recursos, y el daño de los recursos y la infraestructura (Kabirifar et al., 2020). Estos materiales deben ser evacuados del sitio a otro lugar, o puede ser utilizado en el sitio de construcción, pero más allá del objetivo inicial del proyecto.

Los residuos pueden clasificarse según sus propiedades químicas como inertes o no inertes (Laovisutthichai et al., 2020). Los residuos inertes pueden reutilizarse en proyectos futuros e incluyen materiales como tierra, lodo, rocas, concreto, ladrillos y escombros. Los desechos no inertes tienen un valor residual limitado e incluyen materiales orgánicos como madera, bambú, vegetación, desechos de embalaje, plásticos y papel (Laovisutthichai et al., 2020) (Lu y Bao, 2020) (Chen et al., 2021).

2.2 Etapas de una edificación

Una edificación transcurre por diferentes etapas a lo largo de su ciclo de vida, estas son las siguientes (Sharma et al., 2022):

Fase de diseño: En esta etapa, se planifica y diseña el proyecto. Se crean los planos arquitectónicos y de ingeniería, se seleccionan los materiales y se definen los detalles de la construcción.

Fase de construcción: Aquí es cuando se lleva a cabo la construcción física del proyecto según los planos y especificaciones previamente diseñados. Se eligen estructuras, se instalan sistemas y se realiza la construcción en sí.

Fase de uso u operación: Una vez que la construcción está completa y el edificio o estructura está en funcionamiento, se entra en la fase de operación. En esta etapa, el edificio se utiliza para su propósito previsto, ya sea como una vivienda, un espacio comercial o cualquier otro uso. Se realizan tareas de mantenimiento y gestión durante esta fase para asegurarse de que todo funcione correctamente.

Fase de demolición o deconstrucción: Al final de la vida útil del edificio o estructura, cuando se decide realizar un cambio importante o cuando la construcción ya no satisface las expectativas de los usuarios, se entra en la fase de demolición. En esta etapa, se desmantela o destruye la estructura de manera controlada y segura, con el fin de preparar el terreno para futuros proyectos o usos.

Cada una de estas fases representa una parte importante del ciclo de vida de un proyecto de construcción y refleja los principales momentos de planificación, ejecución, uso y eventual cierre de la obra.

2.3 Disposición final

La disposición final constituye la opción final utilizada para la eliminación de residuos de construcción (Yeheyis et al., 2013). Muchos de los elementos que se disponen en vertederos o en terrenos de forma informal son reutilizables o reciclables. Asimismo el enterramiento en vertederos y la disposición de RCD en el océano representan una grave amenaza para el medioambiente (Yeheyis et al., 2013).

La disposición final de RCD debe ser el último paso a considerar en la gestión de estos residuos, de forma que solo los RCD que no se reutilicen o reciclen deben ser eliminados en instalaciones de disposición (Won y Cheng, 2017).

2.4 Building Information Modeling (BIM)

El modelado de información de construcción (BIM, por sus siglas en inglés) es una tecnología espacial y de comunicación de datos utilizada en trabajos en ingeniería y arquitectura. Un modelo BIM es una representación digital de las características físicas y funcionales de una instalación (Won y Cheng, 2017).

Se destaca su utilidad como un recurso compartido de conocimiento para la información sobre una instalación, que permite formar una base confiable para decisiones durante su ciclo de vida, desde el inicio en adelante (Guerra et al., 2020).

Se identifican algunos usos del BIM que tienen influencias positivas en la gestión y minimización de los RCD. Estos son: revisión de diseño, coordinación en 3D, cálculo de cantidades, planificación por fases, planificación de la utilización del sitio, prefabricación digital, control y planificación en 3D y diseño de sistemas de construcción (Won y Cheng, 2017).

BIM cuenta con distintas dimensiones que pueden aplicarse a lo largo de diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto. Las dimensiones más comunes, además de la 3D, son: la 4D para programación, la 5D para estimación de costos, la 6D para sostenibilidad y la 7D para la gestión de instalaciones (Guerra et al., 2020).

El modelo BIM, a través de su interfaz colaborativa y la representación digital de la instalación, brinda una oportunidad para una estimación eficiente y confiable de los RCD (Wang et al., 2021). La mayoría de las empresas han adoptado el uso de BIM para mejorar la colaboración multidisciplinaria, ya que garantiza que todos los equipos del proyecto puedan comunicarse fácilmente y también contribuye a la toma de decisiones y acceso a información sobre el proyecto (Akinade et al., 2018).

2.5 Economía Circular y Jerarquía 3R

La economía circular (EC) es un modelo económico que intenta minimizar los impactos ambientales mediante la gestión eficiente de los recursos, buscando la permanencia de estos en la economía la mayor cantidad de tiempo posible (Reacción, 2021). Este modelo tiene como objetivo restaurar el equilibrio en la naturaleza y añadir la sostenibilidad en los negocios y las operaciones (Sharma et al., 2022).

Contrariamente al modelo lineal en el sector de la construcción, la implementación de la EC busca ser un enfoque sostenible para satisfacer las crecientes necesidades de las personas sin causar impactos perjudiciales en el medioambiente (Sharma et al., 2022). Por lo tanto, este modelo implica un cambio de paradigma, mediante el que se busca priorizar el uso eficiente de recursos, prolongando su vida útil mediante la circulación y buscando reducir su salida del ciclo (Reacción, 2021).

El modelo de EC implica una economía y un sistema restaurativo y regenerativo que propone nuevas formas de diseño, fabricación y uso, teniendo en cuenta los límites del planeta (Reacción, 2021). Esto lo logra mediante la minimización del desperdicio de recursos y energía al ralentizar, estrechar y cerrar los bucles (Sharma et al., 2022). La Figura 2.5.1 muestra el ciclo de vida de los RCD a través de una perspectiva de la EC.

La jerarquía 3R constituye un pilar fundamental para la EC (Sharma et al., 2022). Esta busca la minimización de los RCD y reemplaza el concepto de *final de la vida útil* por la *reducción, reutilización y reciclaje*. La reducción es el primer paso para minimizar la generación de estos residuos; si no se puede evitar la generación, estos deben reutilizarse o reciclarse (Won y Cheng, 2017).

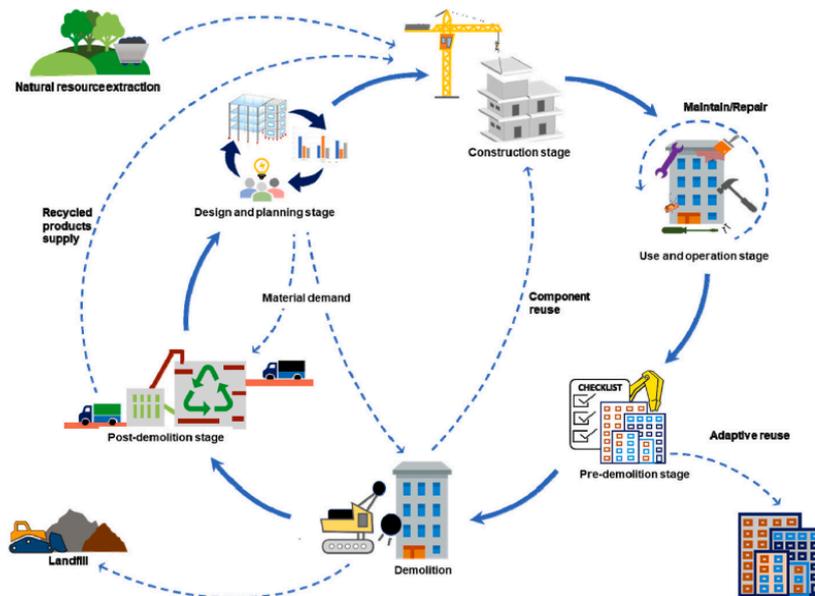


Figura 2.5.1 Ciclo de vida de los RCD según la EC. Adaptado de Sharma et al., 2022.

El primer principio de la jerarquía 3R, reducir, incluye medidas proactivas para prevenir o reducir el consumo de recursos y la generación de residuos (Sharma et al., 2022). Este se refiere a la reducción en la fuente o el uso más eficiente de los recursos. Mediante la precaución se busca minimizar los residuos generados desde la fuente antes de que se conviertan en un problema físico (Yeheyis et al., 2013).

Reutilizar representa el segundo principio dentro de la jerarquía 3R, y busca utilizar más de una vez los elementos generados como residuos durante las actividades de Construcción y Demolición (C&D). El elemento puede ser reutilizado para el propósito original o redirigido para que su integridad, resistencia y calidad no se vean comprometidas (Sharma et al., 2022). La reutilización no requiere tiempo adicional ni energía para volver a usar un material (Yeheyis et al., 2013).

Por último, el reciclaje implica procesar elementos usados o no utilizados que fueron descartados como residuos durante las actividades de C&D para fabricar un nuevo producto (Sharma et al., 2022). El reciclaje implica recolectar, separar, procesar, comercializar y finalmente utilizar un material que de otro modo habría sido desechado (Yeheyis et al., 2013).

3. Situación actual en Uruguay

La construcción en Uruguay es un sector clave para la economía, representando aproximadamente el 10% anual del PIB nacional entre 2013 y 2018 y siendo el sector que emplea entre el 7% y el 8% del total de personas ocupadas en el país desde 2011 (Ministerio de Ambiente, 2021). Según el Plan Nacional de Gestión de Residuos, publicado por el Ministerio de Ambiente (MA) en 2021, el aumento actual en la actividad de la construcción implica un aumento en la generación de RCD, por lo que se debe apuntar a una gestión adecuada de los mismos.

De acuerdo a la Ley Nacional de Gestión Integral de Residuos n. ° 19829 los residuos de obras de construcción constituyen «los generados en las actividades de construcción, reforma o demolición de obras, con excepción de los procedentes de obras menores de reparación doméstica que se consideren comprendidos en los residuos domiciliarios» (Artículo 5, Ley 19829, 2019).

Según datos de la Intendencia de Montevideo (IM), los residuos de obras civiles representan más del 30% de los residuos que llegan al sitio de disposición final Felipe Cardoso. En la actualidad su gestión no es formal ni regular, lo que genera un alto impacto ambiental (Pessio, 2021).

En el año 2018 ingresaron aproximadamente unas 280.000 toneladas de residuos de obras civiles a Felipe Cardoso. Mientras que en 2019 se estimó que la generación de estos residuos puede alcanzar las 1.760.000 toneladas anuales, de las cuales 900.000 se generarían en Montevideo (MA, 2021)

ReAcción es una empresa de servicios que brinda herramientas para un cambio cultural en sustentabilidad medioambiental en las empresas. En Uruguay, es pionera en la gestión de residuos de obras civiles, desde cómo lograr el menor impacto ambiental posible hasta en términos de innovación, como por ejemplo maquinarias y herramientas innovadoras para dicha gestión. Hoy en día en la gestión de RCD en Uruguay se identifica la ausencia de infraestructura e información para la valorización de las cantidades generadas (ReAcción, 2021). También existe una ausencia de infraestructura para disponer estos residuos en rellenos inertes y por eso se disponen en los vertederos departamentales.

Los porcentajes de disposición informal de RCD resultan alarmantes. Según los datos publicados por Roda y Pigola (2021), el 44% de los RCD se dispone en terrenos de manera informal y el 46% son vertidos en el mismo sitio que los residuos sólidos urbanos.

De acuerdo a datos publicados sobre la disposición de los RCD generados en Montevideo, en el año 2018, se estima que el 46% ingresó al relleno sanitario municipal de Felipe Cardoso, el 44% se dispuso de manera informal, el 10% como relleno en predios controlados y menos del 1% se llevó a plantas de reciclaje (ReAcción, 2021). En la Figura 3.1 se resume lo mencionado anteriormente.

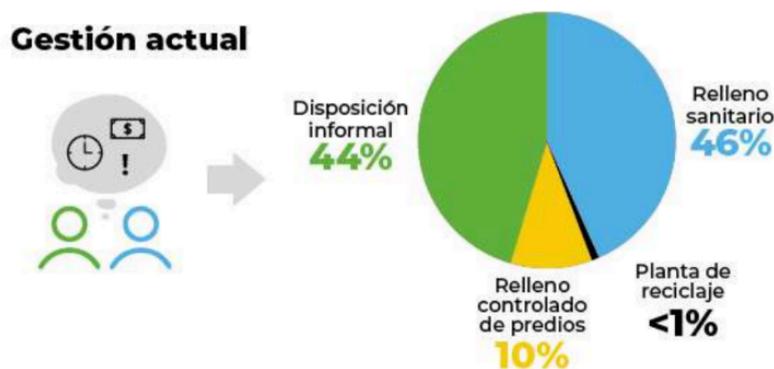


Figura 3.1 Gestión actual de residuos de construcción en Uruguay. Adaptado de Reacción, 2021.

La gestión actual de residuos en Montevideo se esquematiza en la Figura 3.2, en donde se observa que dependiendo el tipo y magnitud de proyecto de construcción se exige o no un plan de gestión de residuos sólidos. Además, dentro de la IM no existe un responsable de la regulación, fiscalización y control de los RCD (Roda y Pigola, 2021).

En Montevideo para disponer los residuos como relleno en predios privados se debe pedir una autorización, que se tramita para cada obra y se exige un proyecto de relleno. Sobre las demoliciones, se debe pedir permiso en el centro barrial que corresponda y no se controla el destino de los residuos generados. Si se desea disponer los residuos en el sitio de disposición final de los residuos sólidos urbanos, se debe tramitar el ingreso de los RCD al sitio y se debe pagar un costo asociado, a excepción de residuos de excavación y escombros pequeños y limpios que están exonerados de costos (Roda y Pigola, 2021).

Cabe destacar que en el país solo existe una empresa dedicada a la valorización de RCD que opera desde 2018 y recibe escombros limpios de obras como hormigón, morteros, cerámicos y mampuestos (MA, 2021). La empresa se llama RCD Reciclaje y en 2020 procesó 2.310 toneladas de escombros y en 2021 2.260 toneladas, con un porcentaje de descarte del 20%. En la Figura 3.3 se presentan las tarifas correspondientes a esta empresa y se comparan con las tarifas de Felipe Cardoso.

El 26 de mayo de 2021 la IM, el MA y la Cámara de la Construcción del Uruguay (CCU) firmaron un convenio con el objetivo de avanzar en la creación de un sistema de gestión

de residuos de obras civiles, enmarcado en la Ley de Gestión Integral de Residuos vigente actualmente (Pessio, 2021).

En el convenio se establecieron obligaciones para las diferentes partes. A la IM se le encomendó elaborar una normativa departamental y conformar una oficina institucional que acompañe la gestión de RCD dentro del gobierno departamental. Para la CCU generar instancias de sensibilización y capacitación, promover la inversión en infraestructura de valorización y disposición final de residuos de obra civil y llevar adelante las acciones que permitan desarrollar un plan de gestión. Para el MA elaborar la normativa nacional específica de RCD (Cámara de la Construcción del Uruguay, 2022).

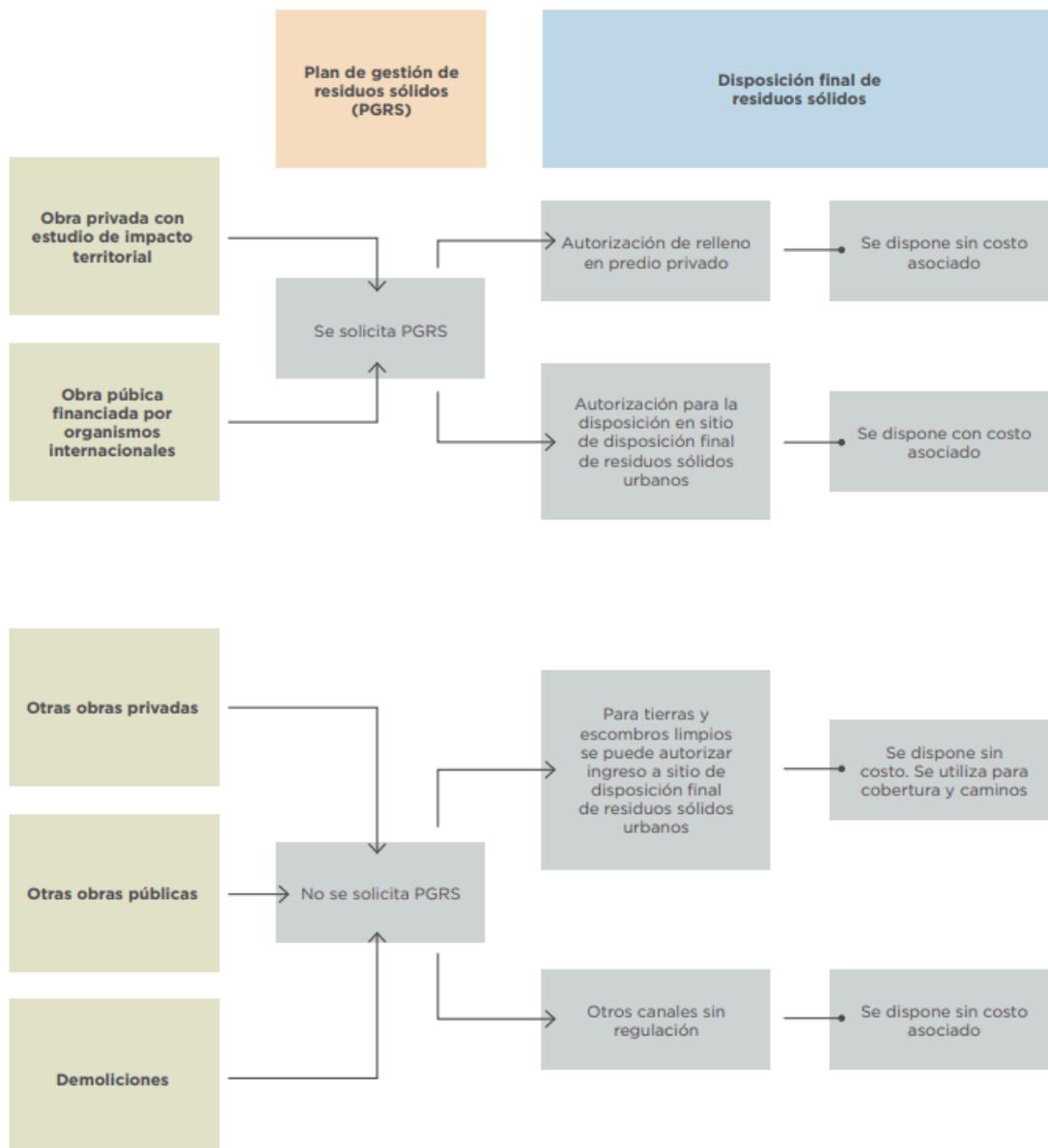


Figura 3.2 Gestión actual de RCD en Montevideo. Adaptado de Roda y Pigola, 2021.

Sector origen del residuo	RCD (USD/m ³)	Felipe Cardoso (USD/m ³)
Obras de construcción	15,3	9,2 a 30,7
Comercio	30,7	30,7
Industria	30,7	61,4

Figura 3.3 Tarifas actuales de disposición de residuos de obras civiles. Adaptado de Ministerio de Ambiente, 2021.

Los RCD dentro de Montevideo se van a clasificar en cuatro grupos y cada uno se gestionará en forma específica, con el fin de minimizar la disposición de estos residuos en Felipe Cardoso y fomentar su reutilización y valorización (Pessio, 2021). Estos grupos y sus formas de gestión se detallan a continuación:

1. Las tierras fértiles (horizonte A y B, rico en materia orgánica) irán al Servicio de Áreas Verdes de la Intendencia y al Vivero Municipal, para ser utilizadas en plazas, parques u otros lugares.
2. Las tierras de excavación (tierras limpias) se destinarán para rellenos de predios que lo necesiten.
3. Los escombros limpios se enviarán a predios previstos por la Intendencia y las empresas constructoras.
4. Los escombros mezclados o sucios se dirigirán a Felipe Cardoso para su disposición final.

En el Plan Nacional de Gestión de Residuos, elaborado por el MA a fines de 2021, se detalla que el documento representa un instrumento de planificación estratégica a nivel nacional que busca lograr la mejora de la gestión de residuos con el fin de avanzar hacia un Uruguay más circular. Este plan es el primero que se realiza a nivel nacional y se enmarca dentro de lo establecido en la ley de Gestión Integral de Residuos (MA, 2021).

En el documento mencionado anteriormente se detallan los avances destacados sobre la gestión de RCD entre los que se encuentran la elaboración de un plan de gestión de estos residuos para Montevideo que está en desarrollo y la instalación de capacidades para su valorización (MA, 2021).

Por otro lado se destacan las principales debilidades en este tema y entre ellas se encuentran: falta de regulaciones específicas para gestión de RCD, falta de segregación de los residuos, presencia de residuos domésticos en las volquetas ubicadas en las calles destinadas para RCD, baja trazabilidad y tasa de valorización, capacidad insuficiente para su valorización (solo se valorizan residuos limpios), alto porcentaje que se disponen de manera informal y falta de formalidad en el sector. Además, ausencia de mercado de materiales reciclados para utilizar en construcción, procesos de demolición que la

reutilización de materiales no se maximiza y uso ineficiente e inadecuado de las instalaciones de Felipe Cardoso, entre otros (MA, 2021).

Si bien se presentan avances en la gestión de este tipo de residuos, se evidencia que aún existen muchas debilidades y resta un largo camino por recorrer en el país, donde se deberá trabajar para mejorar la gestión de los RCD, buscando aumentar su valorización y formalizando su disposición.

4. Revisión sistemática de la literatura

En esta sección se presenta la revisión de la literatura sobre la gestión de RCD, con el fin de entender la temática y comprender cuáles son los desafíos y tendencias actuales. Además se busca demostrar el interés de la comunidad científica en el tema en los últimos años.

Como primer paso, se realizó una búsqueda de todos los trabajos realizados desde 2013 hasta mayo de 2023. Esta búsqueda se hizo a través de una metodología sistemática, de forma tal de que se pueda verificar y reproducir. Esta se detalla en el siguiente apartado.

4.1 Metodología

Una metodología sistemática es un conjunto de pasos definidos que garantizan una búsqueda exhaustiva, verificable y repetible de los distintos documentos que se encuentran acerca de la temática en cuestión. En la Figura 4.1.1 se presenta un diagrama de flujo que resume la metodología de esta revisión.

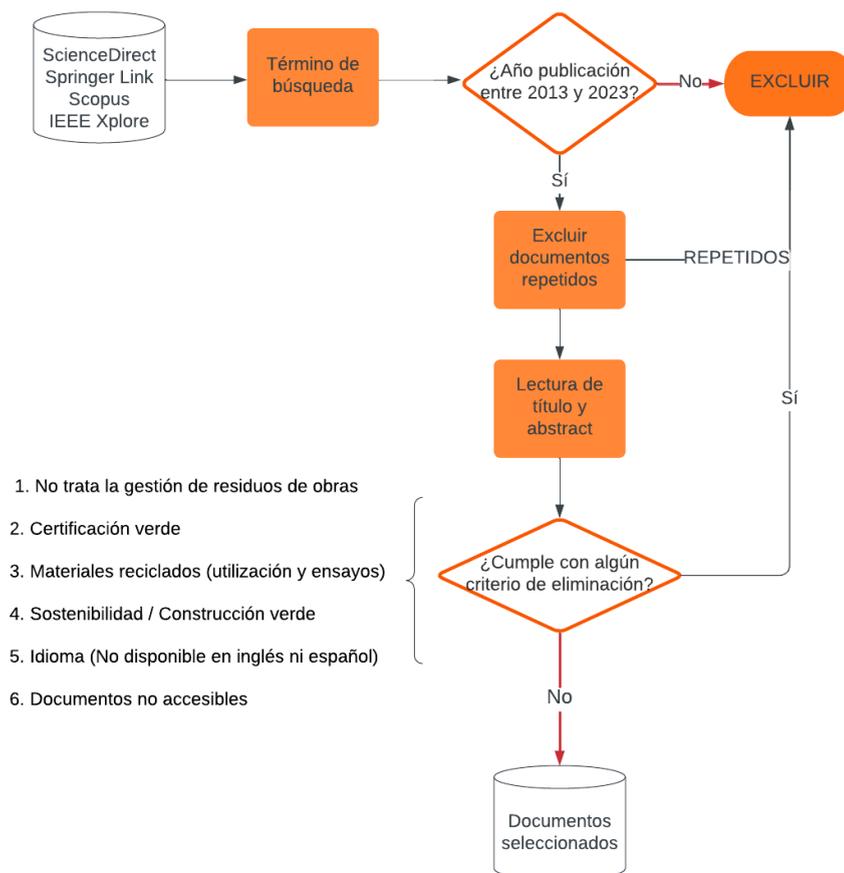


Figura 4.1.1 Diagrama de flujo de la revisión sistemática. Fuente: elaboración propia mediante Lucidchart

Primero se definieron las colecciones ubicadas en el portal Timbó donde se iban a buscar los trabajos; las elegidas fueron Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore y Springer Link. Luego se seleccionó el término de búsqueda en base a las palabras claves:

optimization AND "construction waste management" AND NOT fuzzy AND NOT stochastic AND NOT uncertainty

La palabra clave *optimization* fue añadida debido al interés de conocer los modelos de optimización existentes para el área de *construction waste management* que representa la temática a abordar en el presente documento. En el término de búsqueda también se especificaron algunas restricciones que debían cumplir los modelos de optimización deseados para reducir su complejidad (not fuzzy, not stochastic, not uncertainty).

Se realizó la búsqueda en cada una de las colecciones con dichas palabras claves y un horizonte temporal comprendido entre el año 2013 y 2023. La cantidad de documentos encontrados se presenta en la Tabla 4.1.1. La búsqueda se efectuó el 11 de abril de 2023 y se seleccionaron artículos científicos y capítulos de libros.

Tabla 4.1.1 Cantidad de documentos en la búsqueda por colección. Fuente: elaboración propia

DOCUMENTOS BASE INICIAL	
Colección	Cantidad
ScienceDirect	143
Springer Link	59
Scopus	21
IEEE Xplore	1
Total	224

Tal como se puede ver en la Tabla 4.1.1, la base inicial fue de 224 documentos. El primer filtro de exclusión que se aplicó fue con el fin de eliminar aquellos documentos repetidos en las distintas colecciones. Se encontraron cinco documentos repetidos, obteniendo entonces una totalidad de 219 documentos.

Luego, se descartaron aquellos documentos que no abordaban la temática o que lo hacían haciendo énfasis en otras cuestiones que no integran el interés central de este trabajo. Esto se realizó teniendo en cuenta el título y el abstract de cada uno.

En primer lugar se descartaron aquellos documentos que si bien abordaban la gestión de residuos no se centraban en los RCD, desechando en esta etapa la mayor cantidad de

documentos. Luego se eliminaron aquellos documentos que se centraban en la certificación verde de edificaciones ya que esta no tiene como eje principal a los RCD y su gestión, sino que evalúa otras dimensiones que no son de interés. También se descartaron los documentos que se enfocaban en la utilización y propiedades de materiales reciclados, no necesariamente a partir de RCD. Análogamente se eliminaron aquellos enfocados en sostenibilidad y construcción verde porque, si bien estos métodos buscan reducir los residuos generados, no se centran en la gestión de ellos. Por último se descartaron aquellos documentos a los que no se pudo acceder y un documento que se encontraba publicado solo en su idioma original (croata).

La Tabla 4.1.2 resume los criterios de filtración y la cantidad de documentos que se descartaron según cada uno de los criterios.

Tabla 4.1.2 Criterios para la eliminación de documentos de la base inicial. Fuente: elaboración propia

DOCUMENTOS DESCARTADOS	
Justificación	Cantidad
No trata la gestión de residuos de obras civiles	109
Certificación verde	17
Materiales reciclados (utilización y ensayos)	10
Sostenibilidad / Construcción verde	27
Idioma (No disponible en inglés ni español)	1
Documentos no accesibles	14
Total de documentos descartados	178

Con los criterios de filtración aplicados, se obtuvo una base final de 41 documentos que serán analizados en el presente Estado del Arte.

En la Tabla 4.1.3 se muestran la cantidad final de documentos seleccionados diferenciados por colección.

Se realizó una lectura profunda de cada uno de estos documentos seleccionados en la base final. Luego se clasificaron según distintas categorías que permiten analizar las diferentes características de la gestión de RCD.

Tabla 4.1.3 Cantidad de documentos seleccionados por colección. Fuente: elaboración propia

DOCUMENTOS BASE FINAL	
Colección	Cantidad
ScienceDirect	27
Springer Link	5
Scopus	8
IEEE Xplore	1
Total documentos seleccionados	41

Las categorías se propusieron teniendo en cuenta las diferentes etapas de construcción: diseño, construcción, uso y demolición, ya que se observó que la forma de abordar la gestión de RCD varía según la etapa en que se encuentra la edificación. A su vez, se tuvo en cuenta una categoría para los documentos que se enfocan en todo el ciclo de vida de los residuos, ya que esta forma de encarar el problema se entiende que tiene una visión más amplia y se diferencia en gran medida de los estudios que se centran en etapas específicas del proceso de construcción.

Para contemplar todas las etapas de una construcción, se unificaron como una sola categoría las fases de construcción y uso. Esto se debe a que la fase de uso contaba con una cantidad muy reducida de documentos. Además, en esta etapa en general no se generan grandes cantidades de RCD y los que se generan lo hacen por reformas edilicias que representan una actividad de construcción.

En la Tabla 4.1.4 se presentan la cantidad de documentos seleccionados por cada una de las categorías propuestas.

Tabla 4.1.4 Cantidad de documentos por categoría. Fuente: elaboración propia.

CLASIFICACIÓN DOC SELECCIONADOS	
Categoría	Cantidad
Etapa de diseño	5
Etapa de construcción y uso	10
Etapa de demolición	5
Varias etapas	8
Ciclo de vida	13
	41

En la siguiente sección se realizará un análisis estadístico sobre los trabajos recopilados.

4.2 Análisis estadístico

La Figura 4.2.1 muestra la cantidad de documentos obtenidos en la búsqueda inicial, diferenciados por año y colección. En ella se puede observar que la cantidad de documentos publicados que abordan esta temática ha crecido en los últimos años. La caída que se observa en el 2023 se debe posiblemente a que la búsqueda se realizó hasta el mes de abril de 2023, por lo que muchos trabajos a publicar en ese año quedaron fuera.

La Figura 4.2.2 muestra un análisis similar al anterior pero en este caso se consideran solo los documentos seleccionados, pertenecientes a la base final. En este caso se observa la cantidad de trabajos publicados por año. Puede verse claramente que este tema, si bien ha sido abordado desde hace unos años, en los años más recientes ha cobrado mayor importancia.

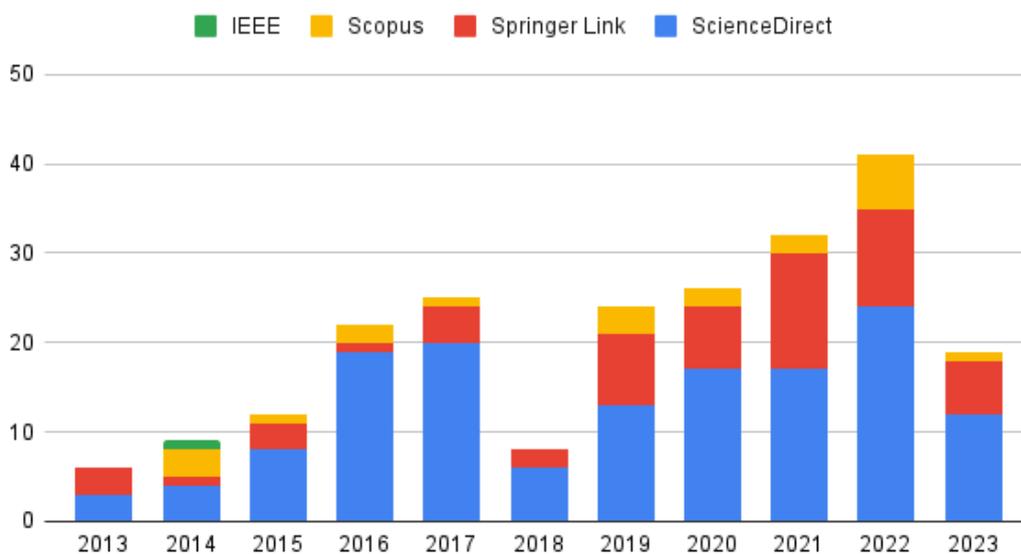


Figura 4.2.1 Cantidad de documentos en la búsqueda inicial por año y colección. Fuente: elaboración propia



Figura 4.2.2 Cantidad de documentos de la base final por año de publicación. Fuente: elaboración propia

Los documentos de la base final, como se comentó en la sección anterior, se clasificaron en cinco categorías. En la Figura 4.2.3 se observa la distribución según las categorías estipuladas. Puede observarse que hay una distribución similar en las categorías, con una leve inclinación a la categoría de ciclo de vida.

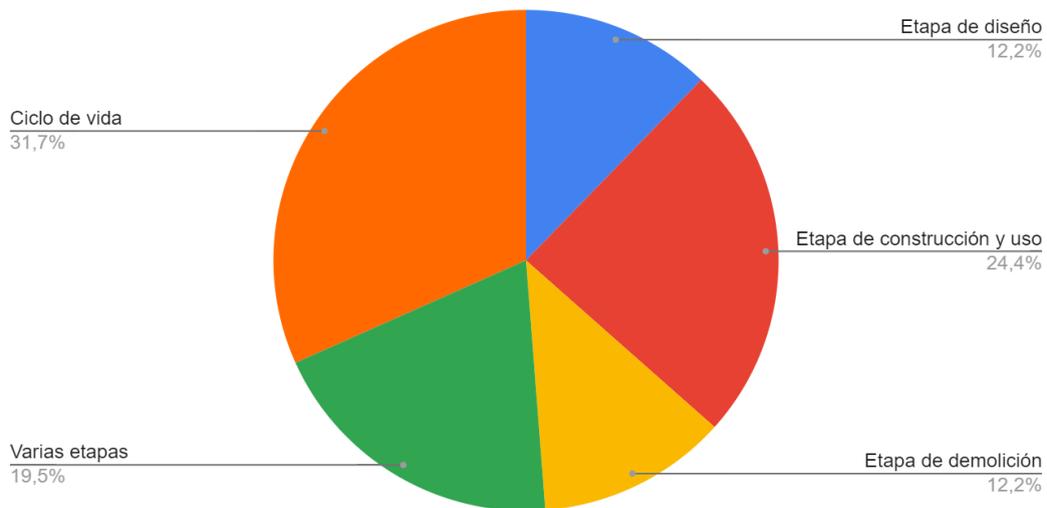


Figura 4.2.3 Distribución de documentos de la base final por categoría. Fuente: elaboración propia

Luego de realizar una lectura completa de cada uno de los documentos pertenecientes a la base final, se identificaron algunos conceptos repetidos en ellos que se consideran relevantes. Muchos de estos representan herramientas para abordar el problema de la gestión de RCD. En la Figura 4.2.4 se puede observar de forma visual la cantidad de veces que se repitieron estos conceptos en los diferentes trabajos. Aquellos con más

apariciones dentro de estos documentos son: la *herramienta de modelado BIM* (25,36%), la palabra *vertedero* (13,08%) y las palabras *reciclar* (13,70%), *reutilizar* (11,44%) y *reducir* (8,99%), que conforman la *jerarquía de las 3R*. El concepto de *minimización* (7%), si bien aparece con cierta frecuencia, es utilizado principalmente en referencia a la minimización de residuos, sin relacionarse con modelos matemáticos.



Figura 4.2.4 Nube de tags: Conceptos relevantes según aparición en la base final. Fuente: elaboración propia mediante Python Colab

4.3 Revisión de los documentos por categoría

La construcción es una industria esencial para materializar el entorno construido, que no obstante ejerce graves impactos negativos en el medioambiente. Por ejemplo, contribuye al agotamiento de recursos, incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ruido, polvo y genera gran cantidad de residuos, conocidos como RCD (Lu et al, 2017). Estos se definen como los productos y materiales excedentes y dañados que surgen de actividades de construcción, renovación y demolición. Además, constituyen una parte considerable de los residuos sólidos totales que contribuyen a la degradación del medio ambiente (Lu et al., 2017).

Los RCD representan aproximadamente la mitad de los residuos generados anualmente (Ismail et al., 2023). Los RCD generados anualmente en China representan del 30% al 40% de todos los residuos generados (Wang et al., 2021), en Europa el 46% (Lu et al., 2022), en Corea del Sur el 48% (Wang et al., 2015), en Estados Unidos más del 50% de los residuos sólidos municipales generados (Lu et al., 2022) y en Japón, la construcción

contribuye con el 20% del total de residuos sólidos generados por todas las industrias (Lu et al., 2017).

Además, se estima que el 35% de los RCD generados a nivel mundial se destinan a vertederos sin ningún tratamiento adicional (Guerra et al., 2020). La abundante cantidad de residuos de construcción demanda una mejor gestión y procesamiento (Lu et al., 2022).

En las siguientes secciones se presentará, a través de un análisis en profundidad de los documentos, el problema sobre la gestión de RCD, cómo se ha abordado y a qué resultados se ha llegado según la etapa del ciclo de vida en la que se encuentra una edificación.

4.3.1 Etapa de diseño

Recientemente se ha comprendido la importancia de la etapa de diseño en la generación de residuos. La toma de decisiones de diseño inapropiadas y cambios inesperados en el diseño aumentarían el volumen de RCD en un 33% (Won y Cheng, 2017). Factores como los cambios en el diseño, las dimensiones no coordinadas, la falta de claridad en el diseño y las especificaciones y los errores de diseño contribuyen significativamente a la generación de residuos en todo el mundo (Laovisutthichai et al., 2020). Un tercio de los residuos de construcción podría reducirse mediante esfuerzos de minimización de residuos realizados en la etapa de diseño (Ajayi et al., 2017). Entonces, los diseñadores tienen un papel decisivo en la reducción de residuos, aunque los resultados de las encuestas muestran que esto se ha practicado solo de manera esporádica (Lu et al., 2017).

En Won y Cheng (2017) se identificaron nueve grupos de limitaciones relacionadas con el proceso y la tecnología en la gestión y minimización de los RCD según las causas de su generación. Los grupos son:

1. Generación adicional de residuos de construcción debido a una mala adquisición y planificación.
2. Cuantificación de RCD que consume tiempo y no es sistemática.
3. Bajos índices de reutilización y reciclaje de RCD.
4. Generación de residuos de construcción debido a una gestión de diseño deficiente.
5. Falta de estandarización y prefabricación debido a dimensiones inexactas de componentes en la fase inicial del proyecto.
6. Generación innecesaria de residuos de construcción debido al doble manejo de materiales.
7. Procesos de gestión inadecuados de RCD en el lugar de trabajo.
8. Participación deficiente en la gestión de residuos.

9. Varios.

A partir de las limitaciones identificadas por Won y Cheng (2017), se puede observar que gran parte de ellas se dan en la etapa de diseño, por lo que resulta importante abordar el problema de la generación de RCD ya en esta fase inicial del proceso de construcción. Los estudios sugieren que existe una tendencia a idear la reducción de residuos durante la etapa de diseño (Ajayi et al., 2017).

En Won y Cheng (2017) se identificaron ocho usos de BIM que pueden evitar las principales causas de generación de RCD:

1. Planificación de fases basada en BIM (o simulación 4D)
2. Cuantificación de materiales
3. Revisión de diseño
4. Detección de conflictos
5. Planificación de utilización del sitio
6. Control y planificación en 3D
7. Fabricación digital
8. Diseño de sistemas constructivos (o maqueta virtual)

Además se presentaron 23 limitaciones en la gestión y minimización de RCD. Uniendo los ocho usos de BIM y las limitaciones identificadas, se propusieron cinco procesos basados en BIM para la gestión y minimización eficientes de RCD. Estos incluyen la revisión de diseño, coordinación en 3D, medición de cantidades, planificación de fases y planificación de la utilización del sitio (Won y Cheng, 2017). Los procesos requieren información como la clasificación de RCD, índices de residuos de cada material de construcción, materiales y equipos (por ejemplo, camiones e instalaciones de clasificación), especificaciones para la gestión de RCD, tasas de pérdida (por ejemplo, corte y trituración), tarifas de disposición de cada tipo de RCD e información de disposición.

BIM es una herramienta utilizada en la etapa de diseño. En Lu et al. (2017) se propone un marco prototípico de un BIM computacional para la gestión de residuos de construcción, resaltando la importancia de la preparación de la información y los algoritmos computacionales. Además, se explora la posibilidad de que BIM se convierta en un entorno computacional para calcular los niveles de generación de residuos, y se relacione el BIM computacional con diferentes modelos de adquisición.

Los algoritmos computacionales desarrollados por Lu et al. (2017) pueden calcular automáticamente las cantidades de una opción de diseño de construcción en BIM. Esto se mapea instantáneamente a la base de datos de tasas de generación de residuos y se estima la cantidad potencial de residuos generados. Una de las limitaciones de los

algoritmos propuestos es su linealidad, dado que puede no reflejar completamente la naturaleza de los residuos generados por las decisiones tomadas en la etapa de diseño.

En Wang et al. (2015) se propone un modelo de dinámica de sistemas utilizando el software Vensim, que incluye variables significativas para evaluar la efectividad de las estrategias de diseño en la minimización de residuos en el diseño.

Los resultados de la simulación realizada por Wang et al. (2015) muestran que: el uso de componentes prefabricados ejerce la mayor influencia en el diseño de la reducción de residuos de construcción, seguido de algunas modificaciones de diseño e inversión en reducción de residuos; existen efectos mutuos entre las estrategias de diseño potenciales; y el efecto combinado de múltiples estrategias de diseño es más significativo que la simple suma de los efectos de todas las estrategias de diseño individuales.

En esta línea, Laovisutthichai et al. (2020) reúnen recomendaciones de Diseño para la Minimización de Residuos de Construcción (DfCWM), desarrollan pautas practicables que se dividen en cuatro etapas de diseño según el Plan de Trabajo RIBA 2020 y las implementan en entornos del mundo real.

Las pautas para la gestión de RCD propuestas por Laovisutthichai et al. (2020) se dividen en cuatro etapas e incluyen:

1. Etapa de Preparación y Definición: Ampliar conocimiento de la minimización de residuos al inicio, considerar métodos de construcción que reduzcan la generación de residuos, prever futuros cambios de la edificación y revisar políticas gubernamentales en este asunto.
2. Etapa de Diseño Conceptual: Fomentar colaboración, simplificar y flexibilizar el diseño y considerar dimensiones y especificaciones materiales para maximizar la eficiencia de recursos.
3. Etapa de Coordinación Espacial: Colaboración, estandarización del diseño, utilizar diseño modular y reutilización de materiales mediante el método de corte y llenado para reutilizar material sobrante.
4. Etapa de Diseño Técnico: Colaboración, selección de materiales considerando su vida útil y aspectos ambientales, diseñar detalles de juntas desmontables para facilitar la reutilización y reciclaje de materiales, incluir procedimientos y soluciones para minimizar residuos, revisar y aprobar todos los documentos y dibujos antes de la realización para reducir errores y omisiones.

Las directrices preliminares de DfCWM se validaron en un caso de la vida real: el diseño arquitectónico de la fachada de un edificio residencial en Tailandia. En este estudio se observó que la consideración de DfCWM durante las cuatro etapas de diseño evitó una

cantidad considerable de residuos potenciales, simplificó los procesos de fabricación y montaje y disminuyó el costo total de la construcción (Laovisutthichai et al., 2020).

En Ajayi et al. (2017) se investigan medidas de adquisición de materiales y logística para mitigar los residuos generados desde la perspectiva de los profesionales del sector, identificando características clave para un proceso de adquisición y logística eficiente en términos de residuos.

El gobierno del Reino Unido financió el programa The Waste and Resources Action Programme (WRAP) donde se identificaron cinco áreas a través de las cuales se podrían diseñar eficazmente los residuos. Estas comprenden el diseño para reutilización y recuperación, el diseño para la construcción fuera del sitio, el diseño para desmontaje y flexibilidad, el diseño para el uso más eficiente de materiales y el diseño para una adquisición eficiente de residuos (Ajayi et al., 2017).

Ajayi et al. (2017) identificaron cuatro características clave del proceso de adquisición y logística. Estas son: el compromiso de los proveedores, una gestión de compras eficiente, una entrega de materiales efectiva y una lista de cantidad optimizada en términos de residuos. Además, destacaron estrategias como esquemas de devolución, adquisición de materiales eficientes en términos de residuos, el uso de embalajes mínimos, el uso de un sistema de entrega Just-in-Time y la prevención de pedidos excesivos.

Se observa que la etapa de diseño ha adquirido una mayor importancia con el tiempo a la hora de gestionar los RCD. Las principales prácticas identificadas para esta etapa incluyen la planificación en la adquisición de los materiales, la estandarización, el diseño modular, el uso de componentes prefabricados y la participación de todas las partes interesadas desde las primeras etapas del proyecto. Se considera de vital importancia abordar el problema de la generación de residuos desde la fase de diseño de un proyecto de construcción o demolición, ya que es en este momento cuando se puede minimizar la producción de residuos de manera más efectiva.

4.3.2 Etapa de construcción y uso

La industria de la construcción genera grandes cantidades de residuos, los cuales han tenido consecuencias negativas tanto ambientales como socioeconómicas (Tafesse et al., 2022). Por lo tanto, resulta crucial fomentar prácticas de gestión de residuos en la construcción, y una efectiva gestión de los residuos de construcción requiere la implementación de estrategias de minimización. Tafesse et al. (2022) argumentan que cuando estas estrategias se aplican de manera eficaz, sus beneficios económicos, medioambientales y sociales son significativos, por lo que la incorporación de iniciativas

para reducir los residuos durante el proceso de construcción, es decir, en sitio, no solo reduce los costos, sino que también disminuye el impacto ambiental.

A continuación, se describen aquellos documentos que tratan la gestión de residuos durante la etapa de construcción, cuáles son los desafíos de gestionar los residuos en sitio y las motivaciones de hacerlo.

La ingeniería eco-industrial es una disciplina que se basa en el ciclo de materiales en procesos ecológicos naturales (Zhou et al., 2014). Estos materiales son aquellos que se reciclan y se reutilizan de manera natural y eficiente en los ecosistemas, como por ejemplo desechos de un organismo que se transforman en recursos para otro organismo.

La ingeniería ecoindustrial se inspira en este proceso natural y busca aplicar principios similares en la planificación y establecimiento de sistemas de producción y consumo industrial. Los principios claves señalados por Zhou et al. (2014) son el reciclaje de recursos, la eficiencia energética y el control de la contaminación. En su artículo, estos autores comienzan por explicar los principios de la ingeniería eco-industrial y luego examinan los desafíos en el procesamiento de RCD dentro de este marco conceptual. Introducen un modelo completo de gestión de RCD y proponen medidas concretas para promover el reciclaje de RCD.

Zhou et al. (2014) afirman que los residuos de construcción se generan durante la planificación, diseño, construcción, uso y demolición de proyectos. Una medida para reducir la cantidad, es minimizar los cambios constantes en los planes y considerar el uso de materiales ecológicos y reciclables. Además, clasificar los residuos de construcción y colocar contenedores adecuados en el lugar de trabajo mejora su manejo y uso. En cuanto a las empresas de reciclaje, creen que el foco debe estar en la protección ambiental durante la producción para suministrar agregados reciclados directamente a las obras. Los residuos de construcción pueden utilizarse en diferentes aplicaciones sin necesidad de clasificación compleja, como relleno o como parte de pilotes compactados.

En resumen, el reciclaje de estos residuos bajo el enfoque de la ingeniería eco-industrial se considera esencial para maximizar los beneficios económicos, ambientales y sociales. Los autores sostienen que mediante este modelo integral de gestión, es posible establecer un ciclo de desarrollo para materiales de construcción, edificios y productos reciclados a partir de residuos de construcción, lo que podría conducir a la producción de edificios ecológicos y por consecuencia, un mayor cuidado con el medio ambiente.

Existen distintas tecnologías de visión por computadora que pueden ser utilizadas para llevar a cabo una buena gestión de residuos en el sitio y algunos documentos demuestran sus múltiples usos.

Wang et al. (2019b) en su artículo utilizan el modelo computacional de Redes Neuronales para el uso de un robot de reciclaje de residuos de construcción. Las redes neuronales procesan información y permiten realizar tareas de aprendizaje automático, reconociendo patrones para tomar decisiones como la forma en que lo hacen las redes de neuronas en el cerebro. En este artículo, las redes representan un espacio de trabajo dinámico, donde cada subregión del espacio es una neurona de la red neuronal (Wang et al., 2019b). De esta forma, la red ayuda al robot de reciclaje en su patrullaje, determinando de esta manera que las áreas no limpiadas atraigan al robot, mientras que los obstáculos lo excluyan (Wang et al., 2019b). Este robot, inspeccionando el entorno de trabajo es capaz de reciclar clavos y tornillos que se encuentren dispersos en la etapa de construcción y reciclarlos automáticamente. El estudio presenta la incorporación de la tecnología de visión por computadora y un algoritmo de planificación de trayectorias para la cobertura completa en el ámbito de la gestión de residuos de construcción, proponiendo así un enfoque innovador para el reciclaje de estos residuos (Wang et al., 2019b).

Por otro lado, Davis et al. (2021) señalan que el uso de tecnologías que identifican automáticamente diferentes materiales mediante la clasificación de residuos en el lugar de la obra tiene el potencial de ayudar a reducir los costos.

El objetivo de esta investigación fue diseñar y describir una red neuronal convolucional profunda para identificar clasificaciones típicas de RCD utilizando imágenes digitales de residuos depositados en un contenedor de obra en un sitio de construcción. La red estaba compuesta por capas convolucionales que permiten obtener características bidimensionales de las imágenes. Este enfoque simuló escenarios auténticos de sitios de construcción donde la clasificación en el lugar es difícil y se logró una precisión del 94%. Esta precisión es importante en proyectos donde se intenta la clasificación en el lugar, ya que en la práctica, la contaminación del contenedor aumenta los costos del proyecto y reduce la desviación de RCD de los vertederos. La clasificación de RCD en el lugar de la obra es un problema. Esta investigación ha demostrado que es posible que las técnicas de aprendizaje automático clasifiquen una variedad de materiales de desecho basados en fotografías digitales.

El proceso convencional de gestión de RCD implica una gran cantidad de documentación para el registro de datos y la asignación de responsabilidades a las partes involucradas, lo que a menudo genera ambigüedad y disputas. La integración de BIM y la tecnología blockchain se presenta como una solución a estos problemas. Sin embargo, hasta ahora ha habido escasa investigación sobre cómo estas tecnologías

digitales pueden abordar los desafíos de la gestión de residuos de construcción. Además, la adopción de la tecnología blockchain en la industria de la construcción se ha visto limitada por la falta de madurez técnica, el alto costo del software y la capacitación.

En su artículo, Liu et al. (2022) exploran el uso de la tecnología blockchain en la gestión de RCD y proponen un marco de gestión de residuos de construcción mejorado con blockchain. Este enfoque aborda desafíos técnicos y prácticos en la adopción de BIM en la gestión de RCD. BeCW utiliza contratos inteligentes para registrar, consultar y validar información relacionada con materiales y residuos a lo largo del ciclo de vida de un proyecto de construcción.

Las contribuciones clave del trabajo de Liu et al. (2022) incluyen la propuesta de un sistema de gestión de RCD basado en blockchain, una metodología integral para su aplicación y un enfoque que garantiza la autenticidad de los registros mediante la verificación y auditoría por parte de los miembros del consorcio.

A partir de la tecnología 4D-BIM, Guerra et al. (2020) proponen algoritmos que integran el tiempo con dicha tecnología para la planificación de la reutilización y el reciclaje de residuos de concreto y paneles de yeso en proyectos de construcción. Estos algoritmos se pusieron a prueba mediante dos estudios de caso en Central Texas, validando las estimaciones con datos reales y valores de la literatura de proyectos en América del Norte. El objetivo principal es agilizar la estimación y la planificación visual de la gestión de RCD, tanto para su reutilización en el sitio como para su reciclaje fuera del mismo. Concretamente, la implementación de este enfoque requiere disponer de un modelo BIM con información 3D de los elementos generadores de residuos de concreto y paneles de yeso, un cronograma de construcción; y registros de compras de materiales de concreto y paneles de yeso.

Dos estudios de caso en Central Texas representando proyectos de edificios estándar se describieron y se utilizaron para demostrar la efectividad de los algoritmos. Según las estimaciones basadas en este enfoque, en el Estudio de Caso A y B, se podrían haber reutilizado más de 40 toneladas y más de 23 toneladas de residuos de concreto respectivamente en el sitio de construcción.

Aunque la reutilización real de estas cantidades depende de las necesidades de relleno limpio en las actividades de relleno, los algoritmos y el BIM 4D permiten la planificación visual de oportunidades de reutilización de residuos de concreto, una práctica que generalmente no se planifica formalmente.

En conclusión, Guerra et al. (2020) proporcionaron un método para identificar visualmente actividades de construcción adecuadas para la reutilización de RCD en el

lugar, lo que permite una planificación más efectiva, utilizaron la herramienta BIM para estimar las cantidades de RCD destinados a reutilización y reciclaje, eliminando estimaciones manuales prolongadas y validaron las estimaciones de reutilización y reciclaje de RCD.

En Egipto, los principales factores que contribuyen a la generación de RCD son:

- deficiencias en la gestión
- falta de conciencia y de cultura ambiental
- poca legislación
- falta de coordinación y alineación entre las partes involucradas en proyectos de construcción
- escasez de vertederos legales
- falta de promoción del reciclaje y la reutilización de los RCD.

Lu et al. (2022) presentan el uso de tecnología pero con un enfoque para el reconocimiento de composición de RCD en entornos complejos utilizando técnicas de segmentación semántica. Se creó un extenso conjunto de datos de imágenes de residuos de construcción y se entrenó un modelo para identificar eficazmente mezclas de materiales en estos residuos en situaciones reales.

Este estudio abre nuevas posibilidades para una gestión más efectiva de los RCD. Por un lado, ofrece una potente herramienta de visión por computadora para evaluar la composición de materiales en vertederos, lo que es esencial para la gestión de residuos en muchas áreas. Esto permite estimar de manera precisa la composición total del vertedero. Por otro lado, proporciona información sobre la ubicación y características de los materiales en mezclas de residuos de construcción, lo que puede guiar a robots en la automatización de la segregación.

Los desechos generados por la construcción abarcan tanto materiales inertes (como arena, ladrillos y concreto) como materiales no inertes (como bambú, plásticos, vidrio, madera y papel).

En Hong Kong, los materiales inertes pueden ser depositados en áreas de relleno público para la recuperación de terrenos, mientras que los materiales no inertes son desechados en vertederos. Sin embargo, los desechos de construcción suelen ser una mezcla de ambos tipos de materiales (Yuan et al., 2013).

Es por esto que es importante segregar esta mezcla y el propósito de Yuan et al. (2013) con este estudio es evaluar la situación actual de las prácticas de segregación de residuos en el lugar de construcción en Hong Kong, prestando especial atención a su evolución en la última década. Se recopilaron datos a partir de estudios de casos en seis sitios de construcción. Se observó que las regulaciones de gestión de RCD han mejorado

de manera significativa la segregación en el lugar de construcción en Hong Kong. Aunque factores como el espacio en el sitio y las opiniones de las partes involucradas en el proyecto aún se consideran críticos, las preocupaciones relacionadas con el trabajo y el costo ya no son obstáculos significativos para llevar a cabo la segregación en el lugar.

Bao y Lu (2021) en su artículo desarrollaron un marco para apoyar la toma de decisiones y facilitar la planificación del reciclaje de RCD, tanto en el lugar de origen como fuera de él. Para lograrlo, se emplearon métodos de investigación cualitativa, como estudios de caso, visitas a sitios de construcción y entrevistas a partes interesadas en Shenzhen, China. El estudio identificó dos factores genéricos que son determinantes en términos de la viabilidad técnica y económica a la hora de reciclar; por un lado las características del proyecto y por otro el respaldo de la industria y el gobierno. Estos dos factores interactúan entre sí y se desarrollan en función del tiempo y el contexto, lo que afecta la toma de decisiones en materia de reciclaje de residuos de construcción.

El estudio se centra en Shenzhen, una ciudad de China que ha experimentado un rápido desarrollo en las últimas cuatro décadas en gran medida en actividades de construcción destinadas a modernizar la infraestructura de la ciudad. Sin embargo, como resultado de estas actividades, se estima que se generan aproximadamente 100 millones de metros cúbicos de RCD cada año, lo que plantea desafíos importantes para el desarrollo sostenible de Shenzhen.

En la última década, por incidentes ocurridos el gobierno de Shenzhen ha promulgado regulaciones de gestión de RCD pioneras en China. Esto incluye el cierre de la mayoría de los vertederos y la implementación exitosa de un sistema de cuotas de disposición de residuos de construcción y un sistema de colaboración entre empresas de demolición y reciclaje. Según datos de 2018, para ese año ya había 42 empresas de reciclaje de residuos de construcción registradas oficialmente, de las cuales 10 se dedicaban exclusivamente al reciclaje fuera del sitio, 27 al reciclaje en el sitio y 5 ofrecían ambas modalidades.

En otro contexto, Tafesse et al. (2022) realizaron una exhaustiva revisión de la literatura con el fin de identificar los impactos ambientales y socioeconómicos de los RCD en Addis Abeba, Etiopía. Se encontraron veinte factores relevantes y sirvieron como base para realizar un cuestionario cuya finalidad era determinar la pertinencia de estos factores para expertos en la ingeniería civil en el contexto local de Addis Adaba. El cuestionario fue distribuido entre ochenta y cinco participantes y se les solicitó que evaluaran el impacto socioeconómico y ambiental de los residuos de construcción utilizando una escala de Likert de 5 puntos.

En términos económicos, el impacto más importante causado por los RCD es el sobre costo de los proyectos de construcción. Cuando hay RCD en los sitios de

construcción, se requieren costos adicionales para re TRABAJAR los materiales, así como para su transporte y disposición. Debido a la presencia de estos residuos, la mayoría de las empresas constructoras experimentan un sobre costo que oscila entre el 6% y el 10% en comparación con el costo total de los materiales adquiridos.

Por otro lado, el impacto ambiental más relevante según los encuestados es la contaminación ambiental de los RCD. Los residuos generados en los sitios de construcción contaminan el medio ambiente al liberar sustancias químicas y otros materiales. Además, generan un impacto significativo a nivel social, el más relevante para los encuestados, por los riesgos para la salud y seguridad pública que conlleva la contaminación.

A partir de los resultados del análisis, se puede afirmar que los RCD representan una preocupación significativa desde una perspectiva ambiental y socioeconómica en Etiopía. Esto se debe al aumento constante en la generación de residuos en más del 90% de los proyectos de construcción en curso. Sin embargo, más de la mitad de las empresas encuestadas han llevado un registro y medición de la cantidad de RCD generados en sus sitios, lo que implica un avance en términos de gestión de RCD.

Dadas las revelaciones de este estudio, Tafesse et al. (2022) proponen varias medidas para abordar este problema y fomentar proyectos de construcción sostenibles, como la implementación de buenas prácticas de gestión en sitio, la reutilización y el reciclaje de materiales sobrantes en el lugar, entre otros.

En algunos países, como Estados Unidos, la elaboración de un plan de gestión de RCD es un requisito legal destinado a reducir al mínimo la disposición de estos residuos o maximizar la desviación en vertederos.

En el contexto de Egipto, Daoud et al. (2021) aportan al conocimiento al cuantificar los RCD en diversos proyectos de construcción, tanto en términos de costos como de tasas de generación, además de explorar la relación entre los factores que reducen los RCD y su generación. Según los resultados del análisis realizado en cuatro proyectos, se ha observado que el material más desperdiciado en términos de tasas de generación de RCD es la madera, seguida por arena y ladrillos. Además, el proyecto de infraestructura resultó ser el más derrochador tanto en tasas de generación de RCD como en costos totales de materiales desperdiciados.

En conclusión, la etapa de construcción es una de las etapas que genera la mayor cantidad de residuos. Los documentos examinados en esta categoría enfocan sus esfuerzos en la gestión in situ de los desechos generados. Esto se logra mediante la aplicación de diferentes tecnologías avanzadas como la visión por computadora, redes neuronales, robots capaces de recolectar y separar los residuos en el lugar de

generación, entre otros. De esta forma no solo aumenta la tasa de reciclaje sino que también se reducen los costos asociados a reciclar. A su vez, durante la construcción de una edificación es esencial implementar medidas para controlar el flujo de residuos. Esto puede incluir desde la contratación de responsables que se dediquen específicamente a su gestión, el uso de componentes prefabricados o fabricados fuera del lugar de construcción hasta la reutilización y el reciclaje de materiales sobrantes en el lugar. Estas prácticas contribuyen de manera significativa a minimizar la cantidad de residuos que se disponen finalmente en los vertederos.

De todas formas, a lo largo de esta fase, la gestión de RCD se torna más compleja principalmente porque los residuos generados en el sitio ocupan espacio de valor, y para una correcta gestión requieren tiempo y recursos. Además, como se mencionó anteriormente, la generación de los residuos está influenciada por el diseño de la edificación. Es importante entonces un abordaje integral del problema. A su vez, una vez que los residuos han sido generados, es fundamental llevar a cabo una clasificación precisa para poder contribuir a la reutilización y el reciclaje, reduciendo al máximo la cantidad de residuos que finalmente deben ser desechados. También, si los residuos se clasifican para disposición final, es importante optimizar las rutas de transporte y planificar su disposición para reducir los costos asociados.

4.3.3 Etapa de demolición

La etapa de demolición o deconstrucción consiste en dismantelar cuidadosamente las partes de una edificación con el fin de recuperar materiales que pueden ser valiosos (Ge et al., 2017). Los residuos de demolición difieren de los residuos de construcción. Dentro de los residuos de demolición se encuentran los escombros de la demolición estructural y no estructural de la edificación. Entre estos residuos pueden encontrarse materiales peligrosos, aislamientos, cableado eléctrico, armaduras, madera, concreto y ladrillos (Ge et al., 2017).

Para la gestión de residuos de demolición se debe evaluar su composición interna, características, apariencia visual, humedad, peso y volumen para su procesamiento posterior (Chen et al., 2021). Además de identificar los tipos de materiales se debe precisar sus ubicaciones, así como estimar con precisión la cantidad de residuos, para poder formular un plan de demolición y una estrategia de gestión de residuos exitosa (Ge et al., 2017).

Existen problemas específicos de gestión de residuos de demolición como falta de visualización del ciclo de vida del proceso, falta de comunicación entre las partes interesadas, medidas de reciclaje insuficientes, procesos costosos, planificación de recursos deficiente, utilización insuficiente de la capacidad de los vehículos y

congestión del tráfico (Kang et al., 2022). Además, no se considera el vínculo entre los planes de demolición y los planes de transporte (Wang et al., 2021).

Es importante contar con una visión integral del proceso de demolición desde diferentes perspectivas y tener la capacidad de planificar y gestionar las distintas etapas de este proceso en tiempo real, debido a la naturaleza dinámica de las demoliciones (Kang et al., 2022). Por otro lado, se debe destacar que reciclar y reutilizar materiales provenientes de la deconstrucción es un desafío, debido a la contaminación cruzada de residuos, barreras tecnológicas y el tiempo y costo involucrado (Ge et al., 2017).

BIM es una herramienta que puede ser aplicada en la etapa de demolición. Por ejemplo, Ge et al. (2017) realizan una investigación en donde buscan identificar cómo se puede utilizar BIM para identificar diferentes materiales (ubicación y cantidad) en un proyecto de deconstrucción, cómo se realiza un modelo 3D reconstruido de la edificación a demoler y cómo se emprende un sistema de gestión de residuos basado en BIM. En particular el sistema de gestión busca mejorar la eficiencia de la demolición, el reciclaje efectivo y el ahorro de costos. Por otro lado, el BIM construido se efectúa para identificar y medir materiales reciclables, así como para desarrollar un plan para el proceso de reciclaje.

Los planes de demolición y gestión de residuos desarrollados por Ge et al. (2017) se realizaron para la deconstrucción de un nivel de un edificio. Los planes se basaron en una metodología innovadora a través de herramientas BIM que demostró ser más precisa y eficiente que los métodos tradicionales. La metodología consistió en desarrollar un modelo 3D reconstruido de la edificación. Luego mediante el uso de BIM se obtuvo un registro detallado de los materiales de desecho, facilitando su seguimiento y gestión. Esta nueva metodología permitió una identificación precisa y clasificación de los materiales, facilitando la formulación de estrategias personalizadas para la gestión de residuos, incluyendo la reutilización, reciclaje y disposición adecuada de materiales peligrosos. En el estudio de caso, se destacaron ejemplos de reutilización de muebles y utilización de materiales reciclados en nuevos proyectos. Los residuos se separaron cuidadosamente y se enviaron a vertederos específicos, aumentando las tasas de reciclaje y reduciendo costos. Esta metodología demostró ser una forma efectiva de gestionar los RCD, promoviendo la reutilización y el reciclaje.

En Kang et al. (2022) también se utilizó BIM. En este caso elaboraron un marco conceptual para la demolición inteligente de edificios que ayuda a maximizar la reutilización y el reciclaje de los residuos de demolición. Permite recopilar, mantener y analizar información integral a través de Smart BIM, que utiliza tecnologías avanzadas como IoT y es capaz de reaccionar a las actividades del usuario. El marco conceptual integra tecnologías digitales (BIM, IoT, IA) para ayudar en la gestión de residuos en esta etapa. Incluye desde el desarrollo de un modelo 3D hasta herramientas analíticas como

la evaluación cuantitativa de residuos, rutas óptimas de disposición y selección de estrategias de gestión de residuos.

Kang et al. (2022) desarrollaron tres servicios fundamentales para agilizar etapas esenciales en el proceso de demolición de edificios. Estos servicios incluyen el escaneo y levantamiento topográfico de residuos, la demolición de edificios y el transporte de los residuos resultantes. Para ilustrar la aplicación de estos servicios, se tomaron en cuenta dos proyectos como casos de estudio. El primero, el edificio principal de la Universidad de Hong Kong, que representa un edificio histórico de baja altura, donde se probó el primer servicio. El segundo caso se basó en un edificio de apartamentos construido en Hong Kong, utilizado para demostrar los servicios de demolición y transporte de residuos. El marco propuesto revela sus ventajas a través de un análisis de costo-beneficio en uno de los estudios de caso. Se exploraron tres escenarios, variando la tasa de reutilización y reciclaje tanto en el sitio como fuera de él. Los resultados de estas comparaciones indican que los beneficios económicos son notables, incluso si solo la mitad de los residuos de demolición se reutilizan y reciclan (según el primer escenario). Este estudio de caso destaca que una gestión de residuos inteligente puede conducir a importantes ahorros económicos.

BIM también se utilizó para desarrollar un sistema de toma de decisiones de demolición y transporte de residuos en Wang et al. (2021). Este permite la participación y coordinación de múltiples actores en el proceso de gestión de estos residuos. El sistema busca proporcionar planes de transporte y planes de demolición de costos óptimos, así como ayudar a los propietarios en la toma de decisiones en todo el proceso de gestión de residuos, desde la demolición hasta la eliminación final. Se basa en una base de datos de Microsoft Access y utiliza modelos BIM para la transmisión de datos. Esto permite una medición precisa y automatizada de las generaciones y tipos de residuos en lugar de depender de mediciones manuales.

Wang et al. (2021) probaron el sistema de toma de decisiones desarrollado en la demolición de un edificio en China. Recopilaron y clasificaron información sobre empresas involucradas en la demolición, transporte y eliminación de residuos de construcción en Chongqing, China. El sistema consta de cinco funcionalidades principales: estimación de componentes estructurales, estimación de componentes arquitectónicos, identificación de residuos reciclables, planificación de gestión de residuos y planificación de demolición. El sistema integra datos desde modelos BIM a una base de datos en Microsoft Access para calcular componentes del edificio como techos, puertas y vigas. Asimismo, proporciona hojas de cálculo para componentes estructurales como columnas, paredes y marcos. Clasifica los materiales reciclables de los residuos de demolición (como concreto, cerámica, vidrio, metal, etc.) y determina su posible reutilización o reventa en el mercado de segunda mano. Además, el sistema elige las empresas de demolición y transporte más eficientes considerando la capacidad y

distancia. Genera planes de gestión de residuos y evalúa costos para materiales reciclables y no reciclables. Muestra los resultados de decisiones y los costos mínimos de eliminación. El proceso de toma de decisiones busca asegurar un procesamiento oportuno de los residuos para evitar acumulaciones en el sitio de construcción y determina el volumen máximo de demolición diaria basado en la eficiencia de trabajo de las empresas involucradas.

El estudio de Chen et al. (2021) se centra en mejorar la evaluación automatizada de la composición de residuos en Hong Kong. Utilizan un conjunto de datos local y aplican una red neuronal convolucional para extraer características visuales de fotos de desechos a granel. Estas características describen los materiales inertes y no inertes. El modelo luego predice si un conjunto de residuos contiene más del 50% de material inerte en peso, lo que es una limitante en los puntos de disposición en la ciudad. Actualmente en Hong Kong, los inspectores determinan manualmente la composición de los residuos, lo cual es un proceso laborioso y propenso a errores. La metodología propuesta busca mejorar esta situación al automatizar el proceso y reducir la dependencia de la intervención humana, que puede ser afectada por factores como la fatiga o la falta de atención.

El modelo híbrido de características visuales y físicas propuesto por Chen et al. (2021) logró una precisión del 94% en la evaluación de la composición de los desechos en sus experimentos. Esta alta exactitud sugiere que, con una adaptación e integración adecuadas, el modelo podría sustituir a los inspectores humanos, mejorando significativamente el funcionamiento de las instalaciones de eliminación de residuos. Este enfoque promueve la automatización de la medición de la composición de los residuos de construcción, lo que se traduce en ahorros de costos laborales, una mayor eficiencia y la garantía de sistemas de gestión de residuos confiables.

La investigación de Bi et al. (2022) se centra en abordar la ineficiencia en la gestión de residuos de construcción en Hong Kong desde una perspectiva logística. Para ello, analizaron una gran cantidad de datos sobre los viajes de camiones de transporte de residuos, identificando tres problemas críticos: elección inadecuada de instalaciones, rutas de viaje desorganizadas y cargas insuficientes.

Para solucionar estas ineficiencias en la gestión de residuos, aplicaron técnicas de big data y adaptaron el problema del vendedor viajero (TSP) para optimizar la secuencia de pedidos de recolección de residuos. El TSP busca la ruta más corta que permita visitar cada parada una sola vez y regresar al punto de origen. Se presenta la formulación Dantzig–Fulkerson–Johnson del TSP (Dantzig et al.,1954) en relación con los objetivos de optimización y las restricciones.

En esta formulación se presentan n ubicaciones que deben ser visitadas y la función objetivo busca minimizar la distancia total de viaje entre las ubicaciones. Además, consideran las restricciones que implican que cada ubicación debe ser visitada una vez y que la solución brinde un solo recorrido y no la unión de recorridos más pequeños. Bi et al. (2022) resuelven el problema para la secuenciación de pedidos optimizada utilizando el programa TSP de Google OR-Tools.

De acuerdo a Bi et al. (2022), el TSP no es directamente aplicable a la recolección de RCD por dos razones fundamentales. Primero, el TSP está diseñado para ubicaciones homogéneas, mientras que la recolección de RCD involucra dos tipos de ubicaciones (sitios de construcción y centros de disposición). Segundo, en el TSP cada ubicación se visita una sola vez. Por lo tanto, se requiere una adaptación del TSP para considerar estos escenarios, ajustando los datos de entrada que determinan las distancias entre cada par de ubicaciones.

Bi et al. (2022) proponen una matriz de distancias de pedido a pedido (OODM) para abordar las particularidades de la recolección de RCD. Cada pedido se asocia a un origen y a un tipo de instalación según el tipo de residuo. Las distancias entre pedidos se calculan considerando tanto el trayecto de recolección como el regreso vacío al siguiente sitio. Esta matriz permite determinar la distancia total de un pedido. Posteriormente, se aplica esta formulación adaptada del TSP a los pedidos en lugar de a las ubicaciones, solucionando así la primera desviación. Se introduce una variable para representar la distancia entre los pedidos, resolviendo la segunda desviación. Las distancias entre los sitios de construcción y las instalaciones de eliminación se obtienen a través de Google Maps.

Además, Bi et al. (2022) desarrollaron un modelo para medir las emisiones de carbono en los viajes. En primer lugar, se estima el consumo de energía multiplicando la distancia del viaje por el consumo de energía promedio. El segundo paso es calcular las emisiones de carbono de los viajes.

En conjunto, las estrategias propuestas en Bi et al. (2022) buscan incrementar la eficiencia del proceso de disposición de RCD al optimizar la elección de instalaciones, la secuencia de pedidos y la carga de los camiones. Las simulaciones realizadas por los autores demostraron que las estrategias desarrolladas, ya sean implementadas individualmente o en combinación, pueden mejorar tanto la eficiencia privada como la pública en la recolección de estos residuos.

En esta etapa se puede concluir que los principales problemas a enfrentar radican en la escasa comunicación entre las partes interesadas. Esto incluye la carencia de planes de demolición, la falta de integración entre estos y los planes de transporte, la carencia de un enfoque específico en la gestión de los residuos generados durante la demolición y la

ausencia de medidas para reciclar y reutilizar ciertos componentes. Teniendo en cuenta los problemas identificados en esta etapa, los documentos sugieren la elaboración de planes de demolición que abarquen todo el proceso de manera integral, con el objetivo de maximizar la reutilización y el reciclaje de materiales. Además, se debe hacer hincapié en la necesidad de coordinación efectiva entre todas las partes involucradas, y, sobre todo, buscar la alineación entre el plan de demolición y el plan de transporte para optimizar la secuencia y carga de los vehículos.

4.3.4 Varias etapas

Las políticas en todo el mundo reconocen que el sector de la construcción necesita acciones inmediatas de mitigación para reducir las emisiones de GEI, el cambio climático y el agotamiento de recursos, con un enfoque en la EC para garantizar el uso sostenible de materiales de construcción (Ghaffar et al., 2019).

La minimización de los RCD no solo depende de las etapas de C&D en sí, sino también de acciones tomadas incluso mucho antes del inicio de la ejecución de una obra. La gestión de RCD en múltiples fases de la construcción puede ser abordada y estudiada desde diversas perspectivas. A continuación, se entrará en detalle de cómo abordan este problema los ocho documentos pertenecientes a esta categoría.

En la mayoría de los países, la conciencia sobre la eficiencia de los recursos en la construcción es baja. Janani et al. (2022) señalan que los desperdicios de materiales y la falta de atención a la minimización de desechos son comunes en este campo. Su estudio se centró en las distintas etapas de proyectos de construcción y los factores clave que afectan la generación de residuos.

El estudio se basó en una encuesta a 100 expertos en ingeniería civil y construcción en Chennai, India, utilizando cuestionarios de Google Forms. Casi la mitad de los encuestados indicó que no existía una ley para minimizar los residuos en la construcción y se identificaron varios factores influyentes en la generación de residuos. Entre ellos surgieron los cambios en el diseño, la programación deficiente en la adquisición de materiales, la falta de control de materiales en el sitio, así como la falta de un plan logístico para el inventario de materiales y residuos de obra como también de un método de minimización de residuos.

Dados los resultados obtenidos, se recomiendan buenas prácticas tanto para la etapa de diseño como de ejecución para reducir los residuos a generar. Para la etapa de diseño, se recomienda realizar estudios detallados del sitio, adoptar un enfoque de planificación integrada, evaluar el impacto ambiental que tendrá el proyecto y apoyarse en un cronograma o plan de acción para el momento que se generen residuos. Para la etapa de construcción se sugiere establecer un seguimiento estructurado para evitar la compra

excesiva de materiales, así como llevar un registro de los residuos que se generen para poder contar con indicadores que por ejemplo permitan comparar la cantidad de materiales comprados versus la cantidad que realmente fueron utilizados.

Bajo un modelo de entrada y salida que compara escenarios en los que existe el reciclaje y escenarios en los que no, Doussoulin y Bittencourt (2021) estudian las diferencias entre Francia, país avanzado en términos de gestión de RCD y Brasil, como el caso opuesto, enfocándose en dos fases del proceso de construcción: la ejecución y el diseño.

En Francia, utilizan la fabricación fuera del sitio de construcción y en Brasil, utilizan el método de moldeado de concreto en el lugar. Este proceso manual, al revés que el método de prefabricación, implica retrabajos considerables debido a las imperfecciones del bloque. El método prefabricado de Francia requiere más mano de obra calificada para la etapa de diseño. Doussoulin y Bittencourt (2021) expresan que en Brasil alrededor del 25% de los residuos proviene de errores de diseño o ejecución.

En Brasil, se dice que el crecimiento exponencial de las ciudades ha afectado en un aumento de RCD con los años. Esto, sumado a la disposición final ilegal que existe y a las políticas inadecuadas, ha impactado negativamente en la gestión de dichos residuos. De 2008 a 2016, el sector de la construcción en Francia disminuyó la cantidad de residuos generados en más de 30 millones de toneladas. Estos resultados se alinean con la Ley de Transición Energética para el Crecimiento Verde, que busca reducir los residuos destinados a vertederos. En Francia, las empresas de construcción buscan reducir los costos de compra de materiales, reciclando los residuos inertes en el sitio, mientras que en Brasil, se enfocan en minimizar los costos logísticos, ya que la conciencia ambiental aún está en desarrollo. De todas formas, tanto en uno como en otro país, se están implementando iniciativas para promover una gestión efectiva de los RCD. Doussoulin y Bittencourt (2021) señalan que la colaboración entre estas naciones podría fomentar a innovar en este campo.

En esta línea de comparación de escenarios, Marzouk y Azab (2013) evalúan los impactos de dos alternativas para la gestión de los RCD, el reciclaje y la eliminación. Esta investigación es un estudio empírico que utiliza una metodología de dinámica de sistemas en el sector de gestión de RCD, desarrollando un modelo dinámico capaz de estudiar el comportamiento del proceso de vertedero a corto y largo plazo y sus impactos en el medio ambiente y la economía de Egipto.

Los autores señalan que los RCD presentan crecientes problemas en los ámbitos ambiental, social y económico. La falta de un marco coherente para la gestión de estos residuos conduce a su disposición, tanto legal como ilegal, lo que causa daños al medio ambiente, aumenta el consumo de energía y agota los recursos limitados de los vertederos.

En base a lo recabado con la metodología empleada, se consideran recomendaciones con el fin de fomentar el reciclaje de C&D en Egipto. Estas recomendaciones van desde establecer centros de reciclaje para los residuos, implementar programas de incentivos para alentar a los involucrados a reciclar sus residuos, activar regulaciones y leyes estrictas para prevenir la disposición ilegal hasta fomentar llevar a cabo un sistema integral para gestionar los residuos en cualquier proyecto de construcción/demolición, imponiendo multas en caso de no cumplir con el sistema.

Para desviar los materiales de RCD en la Región de Waterloo y alcanzar el objetivo de Ontario propuesto en 2002, de desviar el 60% de los RCD, Button et al. (2014) buscan identificar un esquema eficiente con este fin.

Dadas las tasas de generación de residuos, se identificaron seis corrientes de materiales como prioritarias para este estudio sobre el costo del reciclaje: madera, concreto, acero, paneles de yeso, asfalto y tejas. Según la cantidad informada de concreto que se depositó en vertederos, la tasa actual de desvío de concreto es del 40%.

En su estudio Button et al. (2014) buscaron mejorar la gestión de RCD para identificar las tasas de desvío ideales para las seis categorías. Estas tasas deberían minimizar los costos de reciclaje en general y alcanzar una tasa de desvío del 60% de los RCD. La optimización se efectuó utilizando Excel Solver y se sometió a las siguientes restricciones: (i) se estableció una tasa de desvío mínima del 16% para cada tipo de residuo, con el fin de igualar las tasas de desvío actuales en la Región; y (ii) se fijó una tasa de desvío máxima del 90%. Esta tasa máxima se basó en la premisa de que, incluso con las mejores prácticas disponibles, algunos RCD aún terminarán en el vertedero.

Los resultados muestran que es 15% más barato llevar los residuos a los vertederos que reciclarlos. En la mayoría de los casos, los costos asociados con las instalaciones de reciclaje son superiores a las tarifas de los vertederos. Es por eso que es necesario estudiar la estructura de las tarifas de disposición en los vertederos para identificar cuales son las estrategias a seguir para incentivar el desvío de residuos, por ejemplo, aumentar las tarifas de los vertederos y así fomentar el desvío de residuos.

Como resultado de esta investigación, los autores proponen que en vez de imponer un desvío del 60% en todos los flujos de residuos, el costo del reciclaje puede reducirse al aumentar las tasas de desvío para determinados flujos que son más económicos de reciclar.

En Hong Kong, para aplicar tecnologías en la gestión de RCD, Chen et al. (2016) proponen una plataforma de big data. Presentan un marco que abarca la recopilación, almacenamiento y análisis de datos en el proceso de gestión de RCD. El marco de esta plataforma tiene el potencial de proporcionar una comprensión más sólida del

rendimiento gubernamental e industrial en la gestión de residuos de construcción, con el fin de lograr mejoras sostenibles en este ámbito. Es importante destacar que el alcance de este marco se limita a aquellas regiones donde el gobierno gestiona de manera sistemática los residuos de construcción, como es el caso de Hong Kong, ya que las diferentes regiones pueden tener enfoques variados en sus hojas de ruta para la gestión de residuos de construcción.

Este estudio evaluó la viabilidad de la plataforma, haciendo referencia a ejemplos previos de la utilización de grandes conjuntos de datos. Se concluyó que esta plataforma puede contribuir significativamente a la protección del medio ambiente y ofrecer beneficios a una amplia gama de partes interesadas, que incluyen al gobierno, contratistas, profesionales y al público en general.

Es importante señalar que esta investigación solo mencionó algunos ejemplos de los beneficios potenciales de la plataforma. Es recomendable la realización de estudios futuros para explorar más a fondo el valor que se puede obtener de la plataforma de big data, a fin de demostrar la importancia de su adopción en la gestión de residuos de construcción, favoreciendo el impacto ambiental que estos tienen.

Las prácticas actuales de gestión de RCD y la conciencia sobre el concepto de construcción circular (reutilización, reciclaje y recuperación de materiales) son un tema importante a lo largo del mundo. Ghaffar et al. (2020) investigan las prácticas y conciencia existente en Reino Unido a través de las opiniones de partes interesadas relevantes de la industria de la construcción.

Los autores afirman que el primer paso es cambiar la mentalidad de los actores de la industria hacia una producción más limpia de materiales siguiendo las bases de una construcción circular. Una construcción circular, implica que las edificaciones sean diseñadas, planificadas, construidas, operadas, mantenidas y desmanteladas bajo los principios de la EC. Ghaffar, Burman y Braimah (2020) señalan que en términos económicos, el reciclaje de residuos sólo es atractivo cuando el producto obtenido es competitivo en términos de costo, cantidad y calidad. Las tasas de reutilización/reciclaje podrían aumentar significativamente si se introdujera una ley en la construcción del Reino Unido que contemplara el reciclaje en todas las etapas de una construcción.

Este estudio reveló que casi la mitad de los encuestados considera que las operaciones en el lugar deben mejorarse y aplicarse para lograr mejoras en el reciclaje en general y que el principal desafío para el reciclaje de RCD radica en el plan de logística que se lleve adelante. Todos los encuestados comparten la opinión de que la construcción de ciclo cerrado no recibe la suficiente promoción, por lo que se requiere una mejor

difusión para lograr aumentar la conciencia tanto en el público en general como en la industria, lo que debería tener un impacto efectivo.

En este contexto, Li et al. (2022) analizan las publicaciones existentes sobre gestión de RCD desde 2007 hasta 2020, con el fin de comprender los problemas actuales y descubrir las tendencias de desarrollo a nivel mundial. El estudio se apoya en el software CiteSpace que analiza visualmente la información de los 494 artículos seleccionados.

Los temas más mencionados en estos artículos van desde los diversos modelos que se utilizan para estimar la cantidad de residuos a nivel nacional y a nivel de proyectos hasta estudios de las prácticas de gestión y factores para reducir los RCD, entre otros. Los autores afirman que la cuantificación de RCD, los factores de éxito críticos y el principio de las 3R son los temas de investigación más importantes.

Luego de un análisis exhaustivo de la documentación, se puede concluir que existen ciertos enfoques importantes que aún no se han explotado en cuanto a la gestión de RCD:

1. Se necesita realizar más investigaciones acerca de estrategias para la reducción y reutilización.
2. Es esencial profundizar en la investigación sobre las diversas partes interesadas involucradas en proyectos de C&D.
3. Se debe ampliar el análisis para abarcar todas las etapas del ciclo de vida del proceso.
4. Es necesario realizar más estudios sobre los distintos tipos de RCD.
5. Se debe poner mayor énfasis en el desarrollo de métodos precisos y efectivos.

Dada la revisión bibliográfica realizada, se observó un aumento en la cantidad de publicaciones en este campo en los últimos años, con un enfoque destacado en las áreas de Ciencias Ambientales, Ingeniería y Tecnología Verde. Esto significa que se ha generado más conciencia sobre la gestión de RCD y general. Estos resultados proporcionan una visión clara del estado actual de la gestión de RCD y señalan posibles direcciones futuras en este ámbito.

En esta línea, Ismail et al. (2023) también realizan una revisión de la literatura en Egipto e identifican tres factores que afectan la disposición final segura de los RCD. Para lograrlo realizaron un cuestionario en línea que investigaba por un lado, la aplicabilidad y eficacia de los factores de una disposición final segura de RCD y por otro lado, examinaron la relación entre dichos factores y la disposición segura de los RCD.

En el contexto de proyectos de construcción, se generan RCD en varias etapas. En el caso de Egipto, el problema de la disposición de los RCD es el gran desafío, y es

prioridad hallar un método seguro para su eliminación. En este documento, se emplearon diferentes métodos estadísticos como el Índice de Importancia Relativa para clasificar los elementos del marco. Este marco se basa en tres factores de los procesos de gestión de residuos que consisten en varios elementos. En primer lugar, la gestión de rutas, recolección y transporte. También la determinación de sitios ilegales de vertido de residuos y por último, el seguimiento y programación de residuos de construcción. Todos estos factores en la investigación representan las variables independientes (IDVs) que se predicen que afectarán directamente la disposición segura de los RCD, que fue la variable dependiente (DV) del estudio.

Los autores pudieron concluir que el parámetro con la mayor aplicabilidad fue la selección de la ruta de transporte más corta y que el parámetro con la mayor efectividad fue la detección de sitios de vertido ilegal de RCD. En este estudio se realizó un análisis de correlación para determinar las razones de causa y efecto entre cada IDV y el DV. Se encontró que todas las IDV tenían conexiones positivas con el DV. La investigación reveló que la mayoría de las empresas de los encuestados no se preocupan por la disposición segura de los residuos, pero sí identifican la necesidad de crear un marco que incorpore estos elementos en la disposición segura de los RCD en Egipto.

A modo de resumen, es de vital importancia establecer un marco integral para la gestión de residuos, considerando todas o algunas etapas del proceso de construcción. Queda reflejado en los documentos analizados de esta sección que, si los países implementan regulaciones o normativas para la construcción que abarquen todas sus fases, se podrían aumentar de manera significativa las tasas de reciclaje y reducir la existencia de vertederos ilegales. Esto contribuiría a disminuir el impacto ambiental de los RCD.

4.3.5 Ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) es un proceso de evaluación cuantitativa de los impactos ambientales de un producto o actividad. Evalúa los efectos mediante la identificación y cuantificación del consumo de materia prima, de energía y las emisiones de GEI. Esto lo hace considerando el ciclo de vida completo, desde la extracción y procesamiento de materias primas, la producción, el uso, el mantenimiento, la reutilización y el reciclaje hasta la disposición final de los residuos (Wang et al., 2019a).

Los residuos se producen en diferentes tipos y cantidades a lo largo del ciclo de vida de una edificación, con un mayor volumen en las fases de C&D. El LCA se está volviendo popular en el proceso de toma de decisiones para la industria de la construcción y convierte a la sostenibilidad en un impulsor para su desarrollo (Yeheyis et al., 2013).

En este contexto, Yeheyis et al. (2013) proponen un marco conceptual de gestión de RCD que maximiza las 3R y reduce la disposición final de residuos. Esto se logra a través de una estrategia sostenible que abarca todo el ciclo de vida de un proyecto de construcción. También desarrollaron un índice de sostenibilidad para guiar decisiones sobre selección de materiales, clasificación, reciclaje, reutilización y opciones de tratamiento o eliminación de RCD. El artículo proporciona un listado detallado de diferentes tipos de RCD, junto con sus posibilidades de reciclaje o reutilización, su capacidad de biodegradación, la probabilidad de terminar en vertederos y su potencial para la incineración. El marco propuesto se desglosa en tres fases del ciclo de vida del proyecto de construcción: preconstrucción (planificación y diseño), construcción y renovación, y demolición. Esta estrategia integrada, complementada por el índice de sostenibilidad desarrollado, conlleva una reducción significativa de materiales en las etapas de diseño y planificación, así como una disminución de los desperdicios y residuos en el lugar de construcción. Además, promueve la reutilización de materiales en el sitio y fomenta el reciclaje.

A diferencia del enfoque lineal predominante en el sector de la construcción, la implementación de la EC representa una perspectiva sostenible para satisfacer las necesidades de las personas sin ocasionar impactos perjudiciales en el medio ambiente. Este modelo de EC opera como un sistema restaurativo y regenerativo, centrado en minimizar el derroche de recursos y energía al desacelerar, estrechar y cerrar los ciclos, teniendo como eje fundamental la jerarquía 3R.

En esta línea, Sharma et al. (2022) han identificado 33 estrategias clave a nivel global para la gestión de residuos de demolición, siguiendo el marco de la Economía Circular y adoptando una perspectiva integral del ciclo de vida de los edificios. Proponen diversas estrategias para la gestión de residuos en cada etapa del ciclo de vida de demolición. Estas incluyen la estandarización de componentes de construcción, diseño adaptable de edificios, incentivación de la innovación, preferencia por materiales con menor impacto ambiental, responsabilidad extendida del productor, encuestas y auditorías previas a la demolición, uso de tecnología blockchain, mejora del mercado de materiales reciclados, aumento de la participación de partes interesadas y aplicación de mecanismos de subsidios, penalizaciones y recompensas. También evaluaron la perspectiva futura para la gestión de residuos en la industria de la construcción en la India.

Para explorar el tema del reciclaje y reutilización de RCD, se llevó a cabo un estudio exhaustivo por Sepasgozar et al. (2021) que implicó la evaluación de artículos, así como la inclusión de autores claves, redes académicas e información pertinente de Australia, Canadá, el Reino Unido y los Estados Unidos. Además, se recopilaron palabras clave de Twitter de empresas de ingeniería y organizaciones relevantes del sector para explorar posibles correlaciones entre los intereses de la industria y las tendencias de investigación. Su objetivo era analizar la literatura actual sobre la gestión de RCD y

destacar las tecnologías empleadas en su manejo. Se observó que el 42% de las publicaciones se centraban en residuos de concreto, mientras que porcentajes mucho más bajos abordaban materiales como vidrio (2,2%), ladrillo (2,5%), acero (4,3%) y ninguno mencionaba madera. Esto sugiere un sesgo hacia el concreto en las publicaciones, dejando a otros materiales de construcción menos atendidos en la literatura. Asimismo, se encontró que los sistemas de información empezaron a surgir en la literatura más reciente. Aunque no se profundizó en cómo la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG), BIM, impresión 3D y análisis de datos geoespaciales puede contribuir a la gestión de RCD.

Kucukvar et al. (2016) señalaron una carencia en la literatura actual sobre gestión de residuos al no abordar un análisis integral del ciclo de vida ni proporcionar un marco de apoyo basado en la optimización. En su estudio, presentan un modelo de optimización de múltiples criterios destinado a proponer estrategias de gestión de residuos de construcción que sean tanto económicamente sólidas como ambientalmente benignas. Para lograrlo, desarrollaron un modelo híbrido de LCA basado en insumos económicos para evaluar los impactos ambientales de diversas opciones de tratamiento de los RCD, incluyendo reciclaje, vertederos convencionales e incineración. Luego, emplearon un modelo de programación para determinar la estrategia óptima de reciclaje, teniendo en cuenta tanto los impactos ambientales como los económicos de manera simultánea.

El modelo de LCA híbrido propuesto por Kucukvar et al. (2016) combina dos enfoques: el Análisis de Ciclo de Vida basado en procesos (P-LCA) y el Análisis de Ciclo de Vida de entrada-salida económica (EIO-LCA). El P-LCA se utiliza para analizar en detalle los impactos de la gestión de residuos sólidos. El modelo EIO-LCA incluye vectores de uso de agua a nivel de sector, consumo de energía y emisiones de GEI. En general, el análisis de EIO aborda las interdependencias a nivel de sector y representa los requisitos directos sectoriales, que están representados por la matriz A . Esta matriz incluye el valor en dólares de los insumos necesarios de otros sectores para producir un dólar de producción. La producción total de un sector en este modelo económico con una demanda final de f se puede expresar como:

$$x = (I - A)^{-1} \times f$$

x representa el total de la producción e I es la matriz de identidad diagonal. Después de establecer el modelo EIO, los impactos ambientales totales se calculan multiplicando la producción económica de cada sector industrial por los impactos ambientales asociados a cada dólar de producción. Esto se expresa como:

$$R_i = E_i \times X = E_i \times (I - A)^{-1} \times f$$

Donde R_i es el vector de salida ambiental total para la categoría de impacto ambiental i y E_i representa una matriz diagonal, que consiste en los impactos ambientales por cada

dólar de producción para cada sector industrial. Luego, se construyó el modelo híbrido EIO-LCA para considerar los impactos ambientales asociados con diferentes escenarios de gestión de residuos. Este modelo cuantifica las cargas ambientales totales asociadas con el sistema de gestión de residuos, y se presenta en la siguiente ecuación:

$$K_i = E_i \times (I - A)^{-1} \times f + Q_i \times e_i$$

donde K_i denota el impacto ambiental total definido como la suma de las cargas ambientales asociadas con la producción de insumos de recursos y los impactos ambientales directos relacionados con los procesos de tratamiento de residuos. Q_i es el requisito de entrada total para un proceso, y e_i es el factor de impacto ambiental unitario asociado con el consumo de Q_i .

Luego de cuantificar el impacto ambiental total de las diferentes estrategias de gestión de RCD, se prosiguió a desarrollar un modelo para seleccionar la mejor estrategia considerando el impacto económico y ambiental simultáneamente. Para esto se desarrolló en Kucukvar et al. (2016) un modelo de programación de compromiso. El modelo de programación de compromiso mide la distancia según la métrica L_a . La formulación de programación de compromiso basada en la distancia normalizada se escribe como:

$$\begin{aligned} \min L_a &= \min (\sum \pi_k^a (\frac{Z_k^*(X) - Z_k(X)}{Z_k^*(X)})^a)^{\frac{1}{a}} \\ \text{sujeto a } \sum_{k=1}^p \pi_k^a &= 1 \quad 1 \leq a \leq \infty \end{aligned}$$

En esta formulación, Z_k^* representa la solución ideal para el objetivo k . El parámetro p representa el número total de objetivos, y π_k^a se refiere al peso correspondiente asociado con cada objetivo, que en este caso se asume que es igual para cada función objetivo ya que se otorga igual importancia igual a los objetivos económicos y ambientales.

Este modelo se utilizó en Kucukvar et al. (2016) para seleccionar la mejor estrategia de reciclaje, donde los objetivos son: maximizar el valor económico añadido, maximizar el ahorro de GEI, maximizar las reducciones netas en el consumo de energía y agua. Con base en estos objetivos, se formularon y resolvieron las siguientes ecuaciones utilizando un enfoque de optimización multiobjetivo:

$$\text{Max } Z_1(X_i) = \sum_{i=1}^M (C_i \times X_i)$$

$$\text{Max } Z_2(X_i) = \sum_{i=1}^M (GHG_i \times X_i)$$

$$\text{Max } Z_3(X_i) = \sum_{i=1}^M (W_i \times X_i)$$

$$\text{Max } Z_4(X_i) = \sum_{i=1}^M (E_i \times X_i)$$

sujeto a

$$\sum_{i=1}^M X_i \leq LEED_{rf} \times \sum_{i=1}^M Q_i$$

$$X_i \leq Q_i \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, M$$

$$\forall X_i \geq 0$$

Donde i es el índice de material, C_i es el valor económico añadido por tonelada de residuo reciclado para el material i , GHG_i es el ahorro de emisiones de GEI por tonelada de residuo reciclado para el material i , W_i es el ahorro de agua por tonelada de residuo reciclado para el material i , E_i es el ahorro de energía por tonelada de residuo reciclado para el material i , Q_i la cantidad total de residuos generados por el edificio certificado LEED para el material i , $LEED_{rf}$ el factor de reciclaje y la variable de decisión es X_i y representa la cantidad óptima de residuos reciclados asignada para el material i .

El primer objetivo es maximizar el valor económico total añadido. El segundo maximiza los ahorros basados en emisiones de GEI. Los ahorros de agua son abordados por el tercer objetivo. La cuarta maximiza el ahorro de energía. La suma de los residuos óptimos para cada material i es menor o igual a la cantidad total de residuos reciclados multiplicada por el factor de reciclaje. La variable de decisión X_i debe ser menor o igual a los residuos reciclados (Q_i). Finalmente, todas las variables de decisión son mayores o iguales a cero.

Los autores utilizaron el software LINGO© para resolver el modelo, donde se obtiene la cantidad óptima de reciclaje para cada material, con el objetivo de reciclar el 50% del total de residuos de construcción (restricción dada por el parámetro $LEED_{rf}$).

El modelo desarrollado fue aplicado en Kucukvar et al. (2016) a un edificio universitario en Estados Unidos. Los resultados del análisis muestran que el reciclaje de metales ferrosos y no ferrosos contribuyó significativamente a la reducción de la huella de

carbono total. Por otro lado, el reciclaje de asfalto y hormigón aumentó la huella de carbono global debido al alto consumo de combustible y emisiones durante el proceso de trituración. Basados en estos resultados sugieren el reciclaje del 100% de metales ferrosos y no ferrosos, cartón, plástico y vidrio para maximizar los ahorros ambientales y económicos.

En China como en muchos otros países, los vertederos gubernamentales o municipales y los propietarios de vertederos privados cobran una tarifa para depositar los residuos en dichos lugares. Wang et al. (2019a) proponen un método para optimizar la tarifa de gestión de residuos de construcción en China, considerando los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de los residuos y la disposición de la sociedad para mejorar la gestión. El proceso incluye definir el alcance y los límites, analizar el inventario, evaluar los impactos y determinar la tarifa mediante un modelo de disposición a pagar.

Aunque las tarifas para la disposición de RCD varían en el tiempo y el espacio, se presentan estimaciones sugeridas por Wang et al. (2019a) para China. Por ejemplo, se propone una tarifa de gestión de residuos de US\$9,30 por tonelada para residuos metálicos, seguida de US\$5,92 para madera y US\$4,25 para mampostería. La tarifa promedio para la gestión integral de unidades de diferentes tipos de edificios sería de US\$3,63 por tonelada, y la tarifa por área de construcción sería de US\$0,12 por metro cuadrado. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cada ciudad debe considerar su situación específica al determinar el esquema final de eliminación de residuos. El estudio de Wang et al. (2019a) proporciona un método valioso para este fin.

Muchos autores consideran el ciclo de vida de una edificación, pero también se puede considerar el ciclo de vida de los RCD en sí. Esguícero et al. (2021) proponen un marco referencial para modelar los procesos de gestión de RCD a nivel municipal en Brasil, considerando el ciclo de vida de estos residuos. Esta herramienta puede ser empleada para identificar deficiencias y oportunidades de mejora. Los autores identificaron las funciones y el flujo lógico de los procesos de gestión, desde la generación de residuos hasta su disposición final. El modelo abarca seis procesos: generación de residuos, recolección/transporte, inspección, reciclaje, reutilización y disposición final, evaluando tanto el estado actual ("Cómo es") como el estado deseado ("Cómo debería ser"). Aunque el marco puede ser refinado con el tiempo, su aplicación podría contribuir a aumentar la productividad, promover tasas más altas de reciclaje y mejorar la calidad de los productos reciclados, aspectos cruciales para integrar la gestión de residuos y la EC.

En línea con lo anterior, Gan y Cheng (2015) investigan la viabilidad de utilizar material de excavación como relleno en proyectos de construcción, promoviendo así la reutilización de este material. Su enfoque implica el análisis de una cadena de suministro que engloba sitios de construcción, vertederos y fuentes comerciales. En

esta cadena, las partes involucradas colaboran con el objetivo de maximizar la reutilización de relleno y mejorar la eficiencia en la recuperación de residuos. Para lograrlo, proponen y aplican dos modelos: uno de optimización centralizada (COM) y otro basado en agentes distribuidos (ABM).

Para la formulación del COM los autores utilizan un enfoque centralizado para la cadena de suministro de relleno. La cadena comprende vertederos, fuentes comerciales y sitios de construcción, donde algunos exportan relleno (productores P) y otros lo importan (consumidores C). El modelo supone que la cadena es estática durante el tiempo t y utiliza una estructura de red genérica. Se establecen variables y costos para la cantidad de relleno transportada entre nodos y se asume capacidad ilimitada en fuentes comerciales y vertederos. La formulación matemática se presenta para maximizar la exportación de relleno de los productores a los consumidores, minimizando los costos de transporte. El problema de programación matemática se formula de la siguiente manera:

$$\min \sum_{P_i \in P_I} \sum_{C_j \in C_J} X_{P_i C_j}^t C_{P_i C_j}^t + \sum_{P_i \in P_I} \sum_{LF_h \in LF_H} X_{P_i LF_h}^t C_{P_i LF_h}^t + \sum_{CS_w \in CS_W} \sum_{C_j \in C_J} X_{CS_w C_j}^t C_{CS_w C_j}^t$$

sujeito a

$$\sum_{C_j \in C_J} X_{P_i C_j}^t + \sum_{LF_h \in LF_H} X_{P_i LF_h}^t = S_{P_i}^t \quad \forall P_i \in P_I$$

$$\sum_{P_i \in P_I} X_{P_i C_j}^t + \sum_{CS_w \in CS_W} X_{CS_w C_j}^t = D_{C_j}^t \quad \forall C_j \in C_J$$

$$X_{P_i C_j}^t, X_{P_i LF_h}^t, X_{CS_w C_j}^t \geq 0 \quad \forall P_i \in P_I, \forall C_j \in C_J, \forall LF_h \in LF_H, \forall CS_w \in CS_W$$

La función objetivo consiste en minimizar el costo total obtenido (TOC) optimizando el flujo de material de relleno en toda la cadena de suministro. El TOC se puede considerar como un indicador de rendimiento de la recuperación de relleno. La primera parte del TOC es el costo total de envío del relleno de P a C , que incluye el costo unitario de envío, la suma del costo de material y el costo de transporte. La segunda parte del TOC es el costo total de vertido de relleno de los productores a los vertederos, considerando el costo de transporte y el cargo de eliminación de residuos. La última parte del TOC es el costo total de obtención de relleno de fuentes comerciales a consumidores, considerando el costo del material y el de transporte. La primera restricción requiere que el relleno exportado por un productor P_i debe ser igual a la cantidad de relleno enviado a consumidores y vertederos. La segunda expresa que el relleno importado por

un consumidor C_j debe ser igual a la cantidad de relleno obtenido de productores y fuentes comerciales. La última restricción impone no negatividad para las variables.

Por otro lado, los autores desarrollaron el ABM. La lógica detrás de este modelo es que el productor P_i , el consumidor C_j , el vertedero LF_h y la fuente comercial CS_w resuelven problemas de toma de decisiones basados en sus propios objetivos y luego comparten los resultados para llegar a un acuerdo sobre el envío de relleno.

Un agente en el estado de productor tiene como objetivo determinar la cantidad óptima de relleno exportado en diferentes períodos de tiempo, considerando la variación de la demanda y minimizar el costo de envío de relleno (es decir, la suma del costo de transporte y el costo del material). La minimización del costo de envío se logra mediante la coordinación con agentes en el estado de consumidor.

Un agente en el estado de consumidor tiene como objetivo identificar la cantidad óptima de relleno importado en diferentes períodos de tiempo y minimizar el costo de envío de relleno mediante la coordinación con otros agentes.

La mayoría de los sitios de construcción generan relleno que se almacena y se reutiliza en una etapa posterior, y pueden pasar tanto por el estado de productor como por el estado de consumidor en un proyecto. Esto requiere un modelo de agente integrado que pueda cambiar su estado de productor a consumidor. Cuando un productor se convierte en consumidor, se deben tomar decisiones con respecto a la cantidad de relleno que se almacena para rellenar la excavación.

El agente del vertedero modela las operaciones y comunicaciones de un vertedero con productores de relleno. En una cadena de suministro de relleno, el agente del vertedero es responsable de manejar parte del relleno excedente o no deseado exportado por un productor.

Un agente de fuente comercial es responsable de proporcionar el relleno importado requerido por un consumidor. Debido a que la estructura de red de una cadena de suministro de relleno cambia de vez en cuando, la asociación entre consumidores y fuentes comerciales cambiará en consecuencia. Para esto, el agente de fuente comercial debe tener en cuenta una alianza a largo plazo con los sitios de construcción y mantener un registro de seguimiento de la demanda del mercado. Después de recibir un pedido de un consumidor, el agente de fuente comercial envía el mensaje a su departamento de ventas para la preparación y envío de relleno.

Para la etapa de negociación entre los agentes Gan y Cheng (2015) presentan un algoritmo de negociación basado en el protocolo de contrato. El propósito de este

algoritmo es optimizar el flujo de material en toda la cadena de suministro de relleno y maximizar la recuperación de relleno entre los sitios de construcción, reduciendo los costos de envío.

La negociación implica tres etapas principales: anuncio de tarea, licitación y adjudicación. Los consumidores inician el proceso de contratación anunciando su cantidad óptima de relleno importado y el costo unitario de envío de fuentes comerciales. Los productores al recibir estos anuncios, comienzan a clasificar a los consumidores y determinar sus secuencias para la licitación. Luego, se envían ofertas y se otorgan contratos a los oferentes más aceptables.

Al comparar el desempeño entre el COM y el ABM, Gan y Cheng (2015) determinan que el ABM es más adecuado para modelar cadenas de suministro dinámicas, aunque puede presentar cierta pérdida de optimalidad debido a la falta de información global.

Existen un número limitado de enfoques basados en la LCA para tratar la prevención de residuos, que constituye el primer nivel en la jerarquía 3R. Bizcocho y Llatas (2019) abordan la escasez de estos enfoques basados en el LCA para la prevención de residuos, especialmente en el contexto de los RCD. Su estudio busca integrar la prevención en la evaluación de la gestión de RCD a través de una adaptación de la metodología LCA. Para lograrlo, desarrollan dos modelos: uno que evalúa diversos escenarios de gestión de RCD y otro que se centra en la gestión de residuos de hormigón. Al aplicar estos modelos a un caso de estudio en edificios nuevos en España, encuentran que la prevención se destaca como el enfoque más favorable. No solo reduce la cantidad de residuos generados, sino que también disminuye los impactos ambientales en todas las categorías evaluadas en comparación con los escenarios sin prevención. Además, señalan la importancia de integrar plataformas con BIM para facilitar la implementación de la metodología LCA en la gestión y análisis de datos.

Yu et al. (2022) evaluaron la efectividad de las políticas de gestión de RCD en tres ciudades en la región Delta del río Yangtsé de China: Nanjing, Shanghai y Hangzhou. Realizaron un análisis estadístico y una evaluación cualitativa de la cantidad total de RCD y las políticas de gobernanza en estas ciudades durante el período de 2007 a 2018. Los resultados sobre la efectividad de la gestión de los RCD en las ciudades seleccionadas muestran que faltan políticas de gestión legal que busquen beneficios a largo plazo, ya que casi todas ellas tienen solo beneficios a corto plazo sin un impacto duradero en la cantidad de RCD. En base a esto, proponen que las políticas gubernamentales deben ser elaboradas conjuntamente por más departamentos administrativos colaboradores; la cooperación entre diferentes departamentos administrativos debe ser más sustancial en lugar de formalista; los datos detallados sobre los RCD (generación, vertido y reciclaje) deben ser publicados al menos

anualmente por la Oficina de Estadísticas; y se debe establecer una plataforma de monitoreo web en cada ciudad para registrar y supervisar todo el proceso de gestión.

Ninguna de las herramientas de gestión de RCD existentes es compatible con BIM a pesar de sus beneficios para la mejora del rendimiento del proceso de construcción. Es por esto que Akinade et al. (2018) para abordar esta brecha, evalúan las limitaciones de las herramientas existentes y exploran las expectativas de las partes interesadas en la industria de la construcción sobre cómo BIM puede superar estas limitaciones. Se identifican cinco limitaciones de BIM en relación con la gestión de RCD: falta de integración con el proceso de diseño, carencia de capacidades de interoperabilidad, insuficiencia de datos sobre RCD, falta de claridad en las responsabilidades de gestión y ausencia de LCA para el rendimiento de los residuos. A partir de estas limitaciones, surgen cinco grupos principales de expectativas de las partes interesadas sobre el uso de BIM para la gestión de RCD. Estos abarcan la colaboración basada en BIM, soluciones de diseño impulsadas por la gestión de residuos, análisis de residuos a lo largo del ciclo de vida del edificio, tecnologías innovadoras para la inteligencia y análisis de residuos, y mejora de la documentación para la gestión de residuos. Estas expectativas son cruciales para guiar la implementación efectiva de prototipos de software basados en BIM para la gestión de RCD.

Aunque las tecnologías de la información aplicadas en la gestión de RCD están en una etapa temprana, están ganando relevancia en la industria y tienen el potencial de mejorar tanto el LCA de las edificaciones como de los RCD generados, reduciendo los impactos ambientales. Li et al. (2020) llevaron a cabo un análisis exhaustivo de la investigación en esta área, examinando estudios publicados entre 2000 y 2019. Estos trabajos se clasificaron en diferentes tópicos que abarcan la generación, reducción, transporte, reciclaje, disposición y rendimiento de la gestión de RCD. Para cada tópico, se proporcionó una evaluación del estado actual de la investigación y se sugirieron posibles direcciones futuras. Además, identificaron ocho categorías de tecnologías avanzadas utilizadas en la gestión de RCD, estas son: BIM, SIG, big data, identificación por radiofrecuencia, tecnología de reconocimiento de imágenes, análisis de imágenes, sistema de posicionamiento global y tecnología de códigos de barras. Cada una de estas tecnologías fueron analizadas críticamente de acuerdo con sus características y aplicaciones.

En Kabirifar et al. (2020) se analiza críticamente el concepto de RCD y sus problemas de gestión a través de la revisión sistemática de artículos de investigación relevantes. Como resultado de su investigación, identifican cinco brechas fundamentales en esta gestión: existe una marcada disparidad entre los países desarrollados y en desarrollo en términos de gestión de RCD; la efectividad de la gestión de estos residuos aún no se ha evaluado de manera exhaustiva, y se requiere la creación de un mecanismo más completo para evaluar su desempeño; se necesita un mayor estudio sobre cómo las

actitudes de las partes interesadas influyen en la tasa de desviación de RCD, utilizando diversos métodos; hay una considerable necesidad de prestar mayor atención a las nuevas herramientas, tecnologías, técnicas y materiales para la gestión de RCD; para una gestión efectiva de estos residuos, es esencial considerar la jerarquía de gestión, que abarca estrategias de reducción, reutilización y reciclaje. También se recomienda investigar el impacto de cada nivel de esta jerarquía en la eficacia de la gestión de RCD.

Por otro lado, en Aslam et al. (2020) se abordan lagunas en la investigación sobre la gestión de RCD, centrándose en los contextos de Estados Unidos y China. Plantean varias preguntas clave, como las políticas y regulaciones existentes, el enfoque de mercado, los desafíos, la contribución a la EC y las lecciones a compartir entre ambas economías. El fortalecimiento de la legislación y la conciencia pública en ambos países puede cerrar las brechas actuales en la gestión de RCD. La generación de estos residuos se ve influenciada por factores como la población, urbanización, PBI y regulaciones. Para mejorar la gestión, se sugiere una supervisión gubernamental respaldada por incentivos económicos, así como la interacción y coordinación entre partes interesadas y departamentos operativos. También se enfatiza en la importancia de auditorías e inspecciones, junto con la continua integración de tecnologías emergentes. Los autores resaltan que la adecuada utilización de materiales reciclados puede aportar beneficios económicos y ambientales, evitando la acumulación en vertederos.

En resumen, el LCA ha ganado popularidad en los últimos años y comienza a verse como una necesidad en el sector, debido al aumento en el nivel de actividad y en los volúmenes de RCD generados en todo el mundo. Sin embargo, la mayoría de los proyectos de construcción aún no han adoptado este cambio de perspectiva y siguen operando bajo un modelo lineal. Dentro de los documentos analizados que se abordan desde esta perspectiva, se destaca la aplicación de la jerarquía 3R como una estrategia para minimizar la disposición final de residuos. Además, se observa que hay distintos enfoques en este análisis; algunos autores se centran en el ciclo de vida de las edificaciones, mientras que otros lo hacen en el ciclo de vida de los residuos. De todas formas, ambas perspectivas buscan realizar un análisis integral que considere y tome acciones en todas las etapas relevantes del proceso.

5. Conclusiones

En el presente documento se presenta una revisión exhaustiva de la literatura centrada en el problema de la gestión de RCD, analizando los desafíos y tendencias en este asunto a nivel global. El problema fue abordado desde las diferentes etapas de un proceso de construcción o demolición, considerando el ciclo de vida de los residuos. Además, se definieron algunos conceptos clave relacionados a la temática y se buscó reflejar, a lo largo de todo el documento, la importancia y el impacto ambiental y socioeconómico que implica la gran cantidad de RCD generados. A su vez, se resumió el contexto de Uruguay tanto a nivel normativo como de las prácticas actuales de la industria de la construcción.

Dentro de la literatura analizada se identificó un crecimiento significativo en las investigaciones de esta temática. Este aumento puede deberse al incremento de las regulaciones, a la creciente conciencia e interés en reducir el impacto ambiental. Se apunta a minimizar la cantidad de residuos generados, aumentando su recuperación y valorización, con el fin de evolucionar desde un modelo de construcción lineal hacia uno más circular.

Los documentos analizados fueron seleccionados a través de un procedimiento sistemático. De acuerdo al análisis realizado, si bien existe una tendencia a abordar esta temática desde un enfoque integral que abarque todo el ciclo de construcción, existen prácticas específicas para cada una de las etapas de este proceso.

En la etapa de diseño, se subraya la importancia de la planificación de materiales, estandarización, diseño modular y la participación temprana de las partes interesadas para reducir la generación de RCD. Durante la construcción, se enfatiza en la gestión in situ de los residuos mediante tecnologías avanzadas, reduciendo costos y aumentando la tasa de reciclaje. La etapa de demolición enfrenta desafíos en la coordinación y falta de enfoque en la gestión de RCD. Se sugiere la elaboración de planes integrales de demolición apuntando a una coordinación efectiva de todas las partes involucradas. Por otro lado, implementar regulaciones contemplando todas las fases del ciclo de construcción, reduciría la disposición en vertederos ilegales y minimizaría el impacto ambiental. El LCA y la jerarquía 3R se presentan como enfoques clave para minimizar la disposición final de RCD.

En líneas generales, se percibe una carencia de un enfoque integral en la gestión de RCD. En la mayoría de los casos, se observan soluciones fragmentadas que no abordan el problema en todas sus fases, aunque también se aprecia una tendencia hacia un enfoque más holístico. Además, se observa un uso reducido de herramientas de optimización en los planes de gestión. A pesar de que algunos trabajos han desarrollado

modelos de optimización para aspectos específicos, ninguno de los documentos utiliza la optimización para la toma de decisiones a nivel global.

En el contexto de las empresas constructoras, el BIM emerge como una herramienta valiosa ampliamente utilizada. No obstante, en ocasiones no se explota en su totalidad. Esta herramienta tiene el potencial de proporcionar información relevante para todas las etapas del proceso, lo que podría respaldar la creación de planes de gestión de residuos de manera más eficaz e integral.

Se reconoce que, aunque hay una inclinación hacia abordar el problema desde su origen, mediante la reducción de la generación de residuos, en la actualidad las prácticas se centran mayormente en el manejo de los residuos en las etapas de C&D, una vez que ya han sido generados.

Por otro lado, se observa que en Uruguay se ha iniciado recientemente el abordaje de este desafío, pero aún queda un largo camino por recorrer. Es alentador ver la creación de acuerdos entre diversas partes interesadas como la IM, el MA y la CCU, así como el establecimiento de un marco normativo. Sin embargo, se considera importante continuar trabajando en el refuerzo de la implementación y supervisión de las regulaciones. Además, trabajar en la expansión de las buenas prácticas hacia el interior del país.

El LCA se presenta como una valiosa oportunidad para el sector, con el propósito de minimizar la disposición final de los RCD a nivel nacional. Además, es fundamental trabajar en la creación de instalaciones de valorización para verdaderamente aumentar las tasas de reciclaje y reutilización de estos residuos. También se requiere un refuerzo en los controles para reducir la disposición informal de residuos. Se debe fomentar un cambio cultural que promueva la conciencia de todas las partes involucradas en un proyecto de construcción o demolición.

Se considera de vital importancia que todos los actores involucrados en la industria constructora y la sociedad en su conjunto, tomen conciencia de los efectos que conlleva la generación indiscriminada de RCD. Es esencial promover un cambio cultural que fomente una perspectiva integral y más orientada hacia la circularidad.

Las tendencias indican que es crucial llevar a cabo un análisis exhaustivo que abarque todo el ciclo de vida de un proyecto, en donde además se apliquen las tecnologías disponibles. Esto implica una prioridad en la reducción de los residuos generados, especialmente en la etapa de diseño. Seguido por la reutilización de componentes para evitar su descarte, el reciclaje de los residuos generados y, como última opción, la disposición final en vertederos. Estos objetivos pueden alcanzarse a través de una estrategia de optimización que maximice las prácticas de las 3R y minimice la cantidad

de residuos enviados a vertederos. Asimismo, es fundamental que los planes de las diferentes etapas de una edificación estén alineados para lograr una minimización de los costos y del impacto ambiental resultante.

Para el futuro, se vislumbra un camino prometedor en el ámbito de la gestión de RCD. Será esencial continuar impulsando la adopción de prácticas más sostenibles en todas las etapas del proceso, desde el diseño hasta la disposición final. Se requerirá un mayor énfasis en la integración de tecnologías avanzadas y sistemas de gestión de residuos eficientes, utilizando modelos de optimización matemática para la toma de decisiones. Asimismo, el fortalecimiento de regulaciones y la promoción de acuerdos colaborativos entre entidades gubernamentales, la industria de la construcción y la sociedad en general, serán cruciales para avanzar hacia un enfoque más circular y responsable en la gestión de estos residuos. Este camino hacia la sostenibilidad no solo contribuirá a la conservación del medioambiente, sino que también generará oportunidades económicas y sociales significativas en el sector de la construcción.

Referencias

- Ajayi, S., Oyedele, L., Akinade, O., Bilal, M., Alaka, H., Owolabi, H. (2017). Optimising material procurement for construction waste minimization: An exploration of success factors. *Sustainable Materials and Technologies* 11, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.001>
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Arawomo, O. O. (2018). Designing out construction waste using BIM technology: Stakeholders' expectations for industry deployment. *Journal of Cleaner Production* 180, 375-385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.022>
- Aslam, M. S., Huang, B., Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management* 264, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>
- Bao, Z., Lu, W. (2021). A decision-support framework for planning construction waste recycling: A case study of Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production* 309, 127449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127449>
- Bi, W., Lu, W., Zhao, Z., Webster, C. J. (2022). Combinatorial optimization of construction waste collection and transportation: A case study of Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling* 179, 106043. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106043>
- Bizcocho, N., Llatas, C. (2019). Inclusion of prevention scenarios in LCA of construction waste management. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24, 468-484. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1462-8>
- Button, A., Lee, W., Marshall, D., Dawood, Z., MacLellan, S., Umali, H., Pagsuyoin, S. (2014). Management of construction and demolition waste in the Region of Waterloo. En: *2014 Systems and Information Engineering Design Symposium* (pp. 53-56).
- Cámara de la Construcción del Uruguay. (2022). PROYECTO CCU: Sistema integral para la gestión de Residuos de Obras Civiles (ROCs).
- Chen, J., Lu, W., Xue, F. (2021). "Looking beneath the surface": A visual-physical feature hybrid approach for unattended gauging of construction waste composition. *Journal of Environmental Management* 286, 112233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112233>

- Chen, X., Lu, W. Liao, S. (2016). A Framework of Developing a Big Data Platform for Construction Waste Management: A Hong Kong Study. En: *Proceedings of the 20th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate* (pp. 1069-1076).
- Dantzig, G., Fulkerson, R., Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America* 2(4), 393-410.
- Daoud, A. O., Othman, A. A. E., Ebohon, O. J., Bayyati, A. (2021). Quantifying materials waste in the Egyptian construction industry: A critical analysis of rates and factors. *Ain Shams Engineering Journal* 12, 4275-4289. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.039>
- Davis, P., Aziz, F., Newaz, M. T., Sher, W., Simon, L. (2021). The classification of construction waste material using a deep convolutional neural network. *Automation in Construction* 122, 103481. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103481>
- Doussoulina, J. P., Bittencourt, M. (2021). How effective is the construction sector in promoting the circular economy in Brazil and France?: A waste input-output analysis. *Structural Change and Economic Dynamics* 60, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2021.10.009>
- Esguícero, F. J., Deus, R. M., Battistelle, R., Martins, B. L., Bezerra, B. S. (2021). Construction and demolition waste management process modeling: a framework for the Brazilian context. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 23, 2037-2050. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01247-y>
- Gan, V., Cheng, J. (2015). Formulation and analysis of dynamic supply chain of backfill in construction waste management using agent-based modeling. *Advanced Engineering Informatics* 29, 878-888. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.004>
- Ge, X. J., Livesey, P., Wang, J., Huang, S., He, X., Zhang, C. (2017). Deconstruction waste management through 3d reconstruction and bim: a case study. *Visualization in Engineering* 5(13). <https://doi.org/10.1186/s40327-017-0050-5>
- Ghaffar, S. H., Burman, M., Braimah, N. (2020). Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of Cleaner Production* 244, 118710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118710>

- Guerra, B. C., Leite, F., Faust, K. M. (2020). 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams. *Waste Management* 116, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.035>
- Ismail, E. R., El-Mahdy, G. M., Ibrahim, A. H., Daoud, A. O. (2023). Analysis of factors affecting construction and demolition waste safe disposal in Egypt. *Alexandria Engineering Journal* 70, 515-523. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.012>
- Janani, R., Ilango, T., Meenakshi, E., Rajesh Kumar, J. (2022). Minimization of construction waste in Chennai construction industry. *Materialstoday: proceedings* 52, 1884-1890. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.515>
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., Tam, V. W. Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production* 263, 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
- Kang, K., Besklubova, S., Dai, Y., Zhong, R. Y. (2022). Building demolition waste management through smart BIM: A case study in Hong Kong. *Waste Management* 143, 69-83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.027>
- Kucukvar, M., Egilmez, G., Tatari, O. (2016). Life Cycle Assessment and Optimization-Based Decision Analysis of Construction Waste Recycling for a LEED-Certified University Building. *Sustainability* 8(1), 89. <https://doi.org/10.3390/su8010089>
- Laovisutthichai , V., Lu, W., Bao, Z. (2020). Design for construction waste minimization: guidelines and practice. *Architectural Engineering and Design Management* 18(3), 279-298. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1862043>
- Ley 19829 de 2019. APROBACIÓN DE NORMAS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS. 18 de setiembre de 2019. D.O. No. 30.284. <https://www.impco.com.uy/bases/leyes/19829-2019>
- Li, C. Z., Zhao, Y., Xiao, B., Yu, B., Tam, V., Chen, Z., Ya, Y. (2020). Research trend of the application of information technologies in construction and demolition waste management. *Journal of Cleaner Production* 263, 121458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121458>
- Li, Y., Li, M., Sang, P. (2022). A bibliometric review of studies on construction and demolition waste management by using CiteSpace. *Energy and Buildings* 258, 111822. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111822>

- Liu, Z., Wu, T., Wang, F., Osmani, M., Demian, P. (2022). Blockchain Enhanced Construction Waste Information Management: A Conceptual Framework. *Sustainability* 14(19), 12145. <https://doi.org/10.3390/su141912145>
- Lu, W., Chen, J., Xue, F. (2022). Using computer vision to recognize composition of construction waste mixtures: A semantic segmentation approach. *Resources, Conservation and Recycling* 178, 106022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106022>
- Lu, W., Webster, C., Chen, K., Zhang, X., Chen, X. (2017). Computational Building Information Modelling for construction waste management: Moving from rhetoric to reality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 587-595. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.029>
- Marzouk, M., Azab, S. (2013). Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling* 82, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015>
- Ministerio de Ambiente. (2021). *Uruguay + Circular: Plan Nacional de Gestión de Residuos 2022 - 2032*. Recuperado el 21 de agosto de 2023 de <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/PNGR-general.pdf>
- Pessio, A. (26 de mayo de 2021). *Obras en Montevideo deberán contar con un sistema de gestión de residuos*. Intendencia de Montevideo. Recuperado el 17 de agosto de 2023 de <https://montevideo.gub.uy/noticias/medio-ambiente-y-sostenibilidad/obras-en-montevideo-deberan-contar-con-un-sistema-de-gestion-de-residuos>
- Reacción (2021). *Diagnóstico de Circularidad del Sector Construcción (V 1.0)*. Cámara de la Construcción del Uruguay.
- Roda, C., Pigola, P. (2021). *De residuos a recursos: Residuos de construcción y demolición en Montevideo*. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el 18 de agosto de 2023 de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-residuos-a-recursos-residuos-de-construccion-y-demolicion-en-Montevideo.pdf>
- Sepasgozar, S., Mair, D., Tahmasebinia, F., Shirowzhan, S., Li, H., Richter, A., Yang, L., Xu, S. (2021). Waste management and possible directions of utilising digital

- technologies in the construction context. *Journal of Cleaner Production* 324, 129095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129095>
- Sharma, N., Kalbar, P. P., Salman, M. (2022). Global review of circular economy and life cycle thinking in building Demolition Waste Management: A way ahead for India. *Building and Environment* 222, 109413. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109413>
- Tafesse, S., Girma, Y. E., Dessalegn, E. (2022) Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices. *Heliyon* 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09169>
- Wang, J., Li, Z., Tam, V. (2015). Identifying best design strategies for construction waste minimization. *Journal of Cleaner Production* 92, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.076>
- Wang, J., Wu, H., Tam, V. W. Y., Zuo, J. (2019a). Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production* 206, 1004-1014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.170>
- Wang, T., Wu, Z., Luo, C. (2021). Multi-participant construction waste demolition and transportation decision-making system. *Resources, Conservation and Recycling* 170, 105575. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105575>
- Wang, Z., Heng Li, H., Zhang, X. (2019b). Construction waste recycling robot for nails and screws: Computer vision technology and neural network approach. *Automation in Construction* 97, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.009>
- Won, J., Cheng, J. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. *Automation in Construction* 79, 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.002>
- Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M. S., Eskicioglu, C., Sadiq, R. (2013). An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Techn Environ Policy* 15, 81-91. <https://doi-org.proxy.timbo.org.uy/10.1007/s10098-012-0481-6>
- Yu, S., Awasthi, A. K., Ma, W., Wen, M., Di Sarno, L., Wen, C., Hao, J. L. (2022). In support of circular economy to evaluate the effects of policies of construction and demolition waste management in three key cities in Yangtze River Delta.

Sustainable Chemistry and Pharmacy 26, 100625.
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100625>

Yuan, H., Lu, W., Hao, J. J. (2013). The evolution of construction waste sorting on-site. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20, 483-490.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.012>

Zhou, L., Zhao Y., Yin, H. Y. (2014). Construction Waste Recycling Research from the Perspective of Ecological Industrial Engineering. *Applied Mechanics and Materials* 644-650, 5395-5398.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5395>

Apéndice II

Pruebas de validación

En este documento se presentan los valores de los parámetros para las distintas pruebas de validación y los resultados obtenidos. En la Tabla 1 se detalla qué tabla corresponde a cada prueba. En la primera columna se indica el número de prueba. En la segunda columna se detalla la tabla que contiene los valores de los parámetros para cada prueba. En la tercera columna se indica el número de tabla que contiene los resultados obtenidos para cada prueba, en los casos donde se indica un guión significa que no se obtuvo una solución factible en esa prueba.

Tabla 1 Resumen de las Tablas donde se presentan los valores de los parámetros y los resultados para cada prueba de validación. Fuente: elaboración propia

Prueba		Valores de los parámetros	Resultados obtenidos
1		Tabla 2	Tabla 3
2		Tabla 2	Tabla 4
3		Tabla 5	-
4		Tabla 6	Tabla 7
5		Tabla 8	-
6		Tabla 9	Tabla 10
7	a	Tabla 11	Tabla 12
	b	Tabla 13	Tabla 14
	c	Tabla 15	Tabla 16
8	a	Tabla 17	Tabla 18
	b	Tabla 19	Tabla 20
	c	Tabla 17	Tabla 20

Las Tablas que contienen los valores de los parámetros utilizados en las pruebas se componen de dos columnas. En la primera columna se indica el parámetro, mientras que en la segunda se muestra el valor de cada subíndice y el valor asignado al parámetro.

Las Tablas donde se presentan los resultados obtenidos contienen cuatro columnas. En la primera columna se muestra la variable. En la segunda los valores obtenidos para el caso probado. En la tercera columna se detalla si dichos valores coinciden o no con los esperados. En caso de que surjan observaciones se comentan en la cuarta columna.

Tabla 2 Valores de los parámetros para las pruebas 1 y 2. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=350) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=50)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=50)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=150)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=20)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=50) (j=madera, i=2, t=1, qm=80)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=30)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.30) (i=2, G=0.40)

Tabla 3 Resultados obtenidos para la prueba 1. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=50) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=50)	SI	
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=50) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=80)	SI	Entre xr_{ijltw} y $xo_{iji'tw}$ se cumplen las metas de revalorización para las 2 obras
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=150) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=110) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=150)	NO	Está mandado de una obra a sí misma
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=0) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=0)	SI	Cantidad total (entre inventario inicial y residuos generados) = 790 Cantidad enviada + inventario final = 790
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1)	SI	Coherente con xd_{ijhtw}
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1)	SI	Coherente con xr_{ijltw}
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1)	SI	Coherente con $xo_{iji'tw}$
yp_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp=1)	NO	No se cumple qe_{jwil} en ningún caso, la variable debería ser cero en ambos casos

Tabla 4 Resultados obtenidos para la prueba 2. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=50) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=130)	SI	
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=150) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=150)	SI	
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0)	SI	Entre xr_{ijltw} y $xo_{iji'tw}$ se cumplen las metas de rev para las 2 obras No se envían residuos de una obra a sí misma.
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=10) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=0)	SI	Cantidad total (entre inv inicial y generado) = 790 Cant enviada = 780 Inv final = 10
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1)	SI	
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1)	SI	
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0)	SI	
$yp1_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0)	SI	Cumple qe_{jwil} solo para la obra 1
$yp2_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1)	SI	Se activa cuando $yp1_{ijltw}$ es cero y se anula cuando $yp1_{ijltw}$ es uno

Tabla 5 Valores de los parámetros para la prueba 3. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=0) (j=madera, i=2, t=1, qf=0)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=2)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=20)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=30)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=180)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=90) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=200) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=300)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=8)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=100) (j=madera, i=2, t=1, qm=100)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=0) (i=2, j=madera, B=0)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.10) (i=2, G=0.20)

Tabla 6 Valores de los parámetros para la prueba 4. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=0) (j=madera, i=2, t=1, qf=0)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=2)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=0)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=0)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=180)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
cvo_{wit}	(w=1, i=1, i'=2, cvo=90) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=500) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=800)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=2)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=100) (j=madera, i=2, t=1, qm=100)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=0) (i=2, j=madera, B=0)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.10) (i=2, G=0.20)

Tabla 7 Resultados obtenidos para la prueba 4. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0)	SI	
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0)	SI	
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0)	SI	
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=0) (i=1, j=madera, t=1, xb=0) (i=2, j=madera, t=0, xb=0) (i=2, j=madera, t=1, xb=0)	SI	
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0)	SI	
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0)	SI	
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0)	SI	
$yp1_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0)	SI	
$yp2_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1)	SI	

Tabla 8 Valores de los parámetros para la prueba 5. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=300) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=2)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=50)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=0)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=100)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=10) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=15)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=6)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=500) (j=madera, i=2, t=1, qm=500)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=30)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.80) (i=2, G=0.80)

Tabla 9 Valores de los parámetros para la prueba 6. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=300) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=0)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=10)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=100)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=3)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=1000) (j=madera, i=2, t=1, qm=1000)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=10)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.05) (i=2, G=0.05)

Tabla 10 Resultados obtenidos para la prueba 6. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0)	SI	
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=100) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=100)	SI	Lleva el máximo posible, considerando que solo puede hacer 3 viajes
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=100) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0)	SI	Entre xr_{ijltw} y $xo_{iji'tw}$ se cumplen las metas de rev para las 2 obras. No se hacen más de 3 viajes.
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=210) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=210)	SI	Cantidad total (entre inv inicial y generado) = 720 Cant enviada = 300 Inv final = 420
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0)	SI	
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1)	SI	
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0)	SI	
$yp1_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0)	SI	Cumple qe_{jwil} solo para la obra 1
$yp2_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1)	SI	Para la obra 2 el traslado tiene un costo.

Tabla 11 Valores de los parámetros para la prueba 7a. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=350) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=0)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=50)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=150)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=20)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=150) (j=madera, i=2, t=1, qm=150)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=30)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=0)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.15) (i=2, G=0)

Tabla 12 Resultados obtenidos para la prueba 7a. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0)	SI	No se pueden enviar residuos al punto de disposición final
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=100) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=150)	SI	El punto de revalorización puede recibir residuos
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0)	SI	Las obras pueden recibir residuos de otras obras.
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=110) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=130)	SI	Se cumple el balance de inventario.
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0)	SI	El punto de disposición no recibe residuos.
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1)	SI	
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0)	SI	
$yp1_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0)	SI	
$yp2_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1)	SI	

Tabla 13 Valores de los parámetros para la prueba 7b. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=350) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=50)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=0)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=200)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=20)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=200) (j=madera, i=2, t=1, qm=200)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=30)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=0)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.3) (i=2, G=0.4)

Tabla 14 Resultados obtenidos para la prueba 7b. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=50) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=200)	SI	
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0)	SI	
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=200) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=200) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0)	SI	
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=110) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=30)	SI	
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1)	SI	
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0)	SI	
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0)	SI	
$yp1_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0)	SI	
$yp2_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1)	SI	

Tabla 15 Valores de los parámetros para la prueba 7c. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=350) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=50)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=0)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=300)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=20)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=400) (j=madera, i=2, t=1, qm=200)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=30)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=0)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=0) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.15) (i=2, G=0)

Tabla 16 Resultados obtenidos para la prueba 7c. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=50) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=300)	SI	
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0)	SI	No se envían residuos al punto de revalorización
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=300) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0)	SI	No se envían residuos a la obra 1.
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=10) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=130)	SI	
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1)	SI	
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0)	SI	No se revaloriza el residuo en un punto de revalorización.
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0)	SI	Solo una obra puede enviar a la obra que sólo puede recibir.
$yp1_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0)	SI	Como no se puede enviar residuos al punto de revalorización, esta variable no debe activarse
$yp2_{ijltw}$	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1)	SI	Como envio solo a una obra o a un punto de disposición final, $yp2_{ijltw}$ debe valer 1.

Tabla 17 Valores de los parámetros para la prueba 8a y 8c. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=350) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=50)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=50)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=150) (j=madera, w=2, kc=200)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150) (w=2, i=1, h=felipe, cvd=90) (w=2, i=2, h=felipe, cvd=120)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120) (w=2, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=2, i=2, l=rcd, cvr=100)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0) (w=2, i=1, i'=2, cvo=110) (w=2, i=2, i'=1, cvo=100) (w=2, i=1, i'=1, cvo=0) (w=2, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200) (j=madera, w=2, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=2, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=20) (w=2, t=1, qv=5)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=50) (j=madera, i=2, t=1, qm=80)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=30)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.30) (i=2, G=0.40)

Tabla 18 Resultados obtenidos para la prueba 8a. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=50) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=50) (i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, xd=50) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, xd=50)	SI	No llena la capacidad del camión porque debe cumplir los mínimos de recepción de felipe
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=60) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=50) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, xr=50) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, xr=50)	SI	No llena la capacidad del camión porque debe cumplir los mínimos de recepción de rcd
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=2, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=2, xo=0) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=2, xo=80) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=2, xo=0)	SI	Llena capacidad del camión para los casos que puede Los camiones cumplen la cantidad máxima de viajes (el 2 no hace más de 5 viajes)
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=0) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=0)	SI	Cantidad total (entre inv inicial y generado) = 790 Cant enviada = 790
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=1) (i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, yd=1) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, yd=1)	SI	Ok con los xd_{ijhtw}
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=1) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yr=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yr=1)	SI	Ok con los xr_{ijltw}
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0)	SI	Ok con los $xo_{iji'tw}$

	<p>(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=2, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=2, yo=0) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=2, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=2, yo=0)</p>		
$yp1_{ijltw}$	<p>(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp1=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp1=0)</p>	SI	
$yp2_{ijltw}$	<p>(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp2=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp2=1)</p>	SI	No cumple qe_{jwil} en ningún caso

Tabla 19 Valores de los parámetros para la prueba 8b. Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
T	(T = 1)
qf_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qf=350) (j=madera, i=2, t=1, qf=400)
cd_{jh}	(j=madera, h=felipe, cd=20)
cr_{jl}	(j=madera, l=rcd, cr=15)
cb_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, cb=15) (j=madera, i=2, t=1, cb=20)
qd_{jh}	(j=madera, h=felipe, qd=0)
qr_{jl}	(j=madera, l=rcd, qr=0)
kc_{jw}	(j=madera, w=1, kc=150) (j=madera, w=2, kc=200)
cvd_{wih}	(w=1, i=1, h=felipe, cvd=100) (w=1, i=2, h=felipe, cvd=150) (w=2, i=1, h=felipe, cvd=90) (w=2, i=2, h=felipe, cvd=120)
cvr_{wil}	(w=1, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=1, i=2, l=rcd, cvr=120) (w=2, i=1, l=rcd, cvr=100) (w=2, i=2, l=rcd, cvr=100)
$cvo_{wii'}$	(w=1, i=1, i'=2, cvo=120) (w=1, i=2, i'=1, cvo=100) (w=1, i=1, i'=1, cvo=0) (w=1, i=2, i'=2, cvo=0) (w=2, i=1, i'=2, cvo=110) (w=2, i=2, i'=1, cvo=100) (w=2, i=1, i'=1, cvo=0) (w=2, i=2, i'=2, cvo=0)
qe_{jwil}	(j=madera, w=1, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=1, i=2, l=rcd, qe=200) (j=madera, w=2, i=1, l=rcd, qe=100) (j=madera, w=2, i=2, l=rcd, qe=200)
qv_{wt}	(w=1, t=1, qv=20) (w=2, t=1, qv=5)
qm_{jit}	(j=madera, i=1, t=1, qm=50) (j=madera, i=2, t=1, qm=80)
B_{ij}	(i=1, j=madera, B=10) (i=2, j=madera, B=30)
M	(M=9999)
NPR_{jl}	(j=madera, l=rcd, NPR=9999)
NPD_{jh}	(j=madera, h=felipe, NPD=9999)
NO_{ji}	(j=madera, i=1, NO=99999) (j=madera, i=2, NO=99999)
G_i	(i=1, G=0.30) (i=2, G=0.40)

Tabla 20 Resultados obtenidos para la prueba 8b y 8c. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor obtenido	Valor esperado	Observaciones
xd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, xd=0) (i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, xd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, xd=0)	SI	No manda porque es caro y no contribuye a la meta de valorización
xr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, xr=0) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, xr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, xr=80)	SI	Es más caro que enviar a otra obra, lo que envía lo envía en el camión 2 que es más barato
$xo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, xo=150) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, xo=0) (i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=2, xo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=2, xo=200) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=2, xo=200) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=2, xo=0)	SI	Llena capacidad de los camiones Cumple el máximo de viajes
xb_{ijt}	(i=1, j=madera, t=0, xb=10) (i=1, j=madera, t=1, xb=10) (i=2, j=madera, t=0, xb=30) (i=2, j=madera, t=1, xb=0)	SI	Cantidad total (entre inv inicial y generado) = 790 Cant enviada = 780 Inv final = 10
yd_{ijhtw}	(i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=1, yd=0) (i=1, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, yd=0) (i=2, j=madera, h=felipe, t=1, w=2, yd=0)	SI	Ok con los xd_{ijhtw}
yr_{ijltw}	(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yr=0) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yr=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yr=1)	SI	Ok con los xr_{ijltw}
$yo_{iji'tw}$	(i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=1, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=1, yo=0) (i=1, j=madera, i'=1, t=1, w=2, yo=0)	SI	Ok con los $xo_{iji'tw}$

	<p>(i=1, j=madera, i'=2, t=1, w=2, yo=1) (i=2, j=madera, i'=1, t=1, w=2, yo=1) (i=2, j=madera, i'=2, t=1, w=2, yo=0)</p>		
$yp1_{ijltw}$	<p>(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp1=0) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp1=0) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp1=0)</p>	SI	
$yp2_{ijltw}$	<p>(i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=1, yp2=1) (i=1, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp2=1) (i=2, j=madera, l=rcd, t=1, w=2, yp2=1)</p>	SI	No cumple qe_{jwil} en ningún caso

Apéndice III

Datos obtenidos

En este apéndice se presentan los datos obtenidos del caso de estudio que varían según el período. Estos corresponden a la generación de residuos y a la cantidad máxima posible sin recolectar en la obra al final de cada período.

De la Tabla 1 a la 12 se detallan los residuos generados en las distintas obras por fracción para los distintos períodos considerados. En la primera columna se indica la obra y desde la segunda columna a la sexta, se indican los residuos generados por fracción.

De la Tabla 13 a la 24 se presentan las cantidades máximas posibles de residuos sin recolectar en las distintas obras por fracción para cada período. En la primera columna se indica la obra y desde la segunda columna a la sexta, el máximo posible sin recolectar por fracción.

Tabla 1 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para enero 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	14.527	1.439	26	232	9.870
Domus	5.618	65	72	104	2.940
MASMIO	9.007	892	16	144	6.119
More	29.054	2878	52	464	19.740
Carrasco Valley	8.989	104	115	166	4.704
PDLA3	2.360	27	30	44	1.235
Cala	0	0	0	0	0
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 2 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para febrero 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	30.019	1.582	228	804	15.936
Domus	11.588	346	99	354	8.169
MASMIO	18.612	981	141	498	9.880
More	60.038	3.164	456	1.608	31.872
Carrasco Valley	18.541	554	158	566	13.070
PDLA3	4.867	145	42	149	3.431
Cala	0	0	0	0	0
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 3 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para marzo 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	22.255	3.438	233	584	18.397
Domus	14.000	228	329	327	16.880
MASMIO	13.798	2.132	144	362	11.406
More	44.510	6.876	466	1.168	36.794
Carrasco Valley	22.400	365	526	523	27.008
PDLA3	5.880	96	138	137	7.090
Cala	0	0	0	0	0
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 4 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para abril 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	23.665	486	432	413	16.554
Domus	5.125	447	208	78	6.360
MASMIO	14.672	301	268	256	10.263
More	47.330	972	864	826	33.108
Carrasco Valley	8.200	715	333	125	10.176
PDLA3	2.153	188	87	33	2.671
Cala	17.985	369	328	314	12.581
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 5 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para mayo 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	32.307	2.309	708	843	29.996
Domus	0	415	224	195	27.020
MASMIO	20.030	1.432	439	523	18.598
More	64.614	4.618	1.416	1.686	59.992
Carrasco Valley	0	664	358	312	43.232
PDLA3	0	174	94	82	11.348
Cala	24.553	1.755	538	641	22.797
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 6 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para junio 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	24.053	1.889	531	566	23.736
Domus	7.877	187	36	40	6.500
MASMIO	14.913	1.171	329	351	14.716
More	48.106	3.778	1.062	1.132	47.472
Carrasco Valley	12.603	299	58	64	10.400
PDLA3	3.308	79	15	17	2.730
Cala	18.280	1.436	404	430	18.039
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 7 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para julio 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	21.216	340	642	573	16.422
Domus	3.803	148	142	245	6.340
MASMIO	13.154	211	398	355	10.182
More	42.432	680	1.284	1.146	32.844
Carrasco Valley	6.085	237	227	392	10.144
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	16.124	258	488	435	12.481
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 8 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para agosto 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	18.464	480	626	439	21.321
Domus	10.129	398	391	653	13.460
MASMIO	11.448	298	388	272	13.219
More	36.928	960	1.252	878	42.642
Carrasco Valley	16.206	637	626	1.045	21.536
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	14.033	365	476	334	16.204
Brits	1.114	44	43	72	1.481

Tabla 9 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para setiembre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	21.686	574	590	501	26.238
Domus	0	95	176	507	16.110
MASMIO	13.445	356	366	311	16.268
More	43.372	1.148	1.180	1.002	52.476
Carrasco Valley	0	152	282	811	25.776
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	16.481	2.495	448	381	19.941
Brits	1.114	10	19	56	1.772

Tabla 10 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para octubre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	17.821	373	646	633	21.384
Domus	6.600	0	1.026	327	25.930
MASMIO	11.049	231	401	392	13.258
More	35.642	746	1.292	1.266	42.768
Carrasco Valley	10.560	0	1.642	523	41.488
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	13.544	1.882	491	481	16.252
Brits	726	0	113	36	2.852

Tabla 11 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para noviembre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	9.190	619	575	365	15.093
Domus	5.400	0	620	163	10.460
MASMIO	5.698	384	357	226	9.358
More	18.380	1.238	1.150	730	30.186
Carrasco Valley	0	0	0	0	0
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	6.984	2.037	437	277	11.471
Brits	594	0	68	18	1.151

Tabla 12 Residuos generados en kilogramos en las distintas obras por fracción para diciembre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	5.628	385	334	281	10.031
Domus	0	0	0	0	0
MASMIO	3.266	239	207	174	6.219
More	10.536	770	668	562	20.062
Carrasco Valley	0	0	0	0	0
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	2.715	293	254	214	7.264
Brits	594	0	68	18	1.151

Tabla 13 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para enero 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	1.295	41	36	45	2.075
PDLA3	186	6	2	4	238
Cala	0	0	0	0	0
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 14 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para febrero 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	1.295	41	36	45	2.075
PDLA3	186	6	2	4	238
Cala	0	0	0	0	0
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 15 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para marzo 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	1.295	41	36	45	2.075
PDLA3	186	6	2	4	238
Cala	0	0	0	0	0
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 16 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para abril 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	1.295	41	36	45	2.075
PDLA3	93	3	1	2	119
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 17 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para mayo 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	1.295	41	36	45	2.075
PDLA3	93	3	1	2	119
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 18 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para junio 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	1.295	41	36	45	2.075
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 19 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para julio 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	1.295	41	36	45	2.075
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	0	0	0	0	0

Tabla 20 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para agosto 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	390	13	14	14	637
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	647	21	18	23	1.038
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	83	3	3	4	168

Tabla 21 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para setiembre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	195	6	7	7	319
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	647	21	18	23	1.038
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	83	3	3	4	168

Tabla 22 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para octubre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	195	6	7	7	319
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	0	0	0	0	0
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	83	3	3	4	168

Tabla 23 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para noviembre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	0	0	0	0	0
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	0	0	0	0	0
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	83	3	3	4	168

Tabla 24 Máximos posibles de residuos en kilogramos sin recolectar en las distintas obras por fracción para diciembre 2023. Fuente: elaboración propia

OBRAS	Escombros	Metal	Cartón y papel	Plásticos	Basura
Ventura	2.004	116	46	52	1.875
Domus	0	0	0	0	0
MASMIO	621	36	14	16	581
More	4.008	232	93	104	3.750
Carrasco Valley	0	0	0	0	0
PDLA3	0	0	0	0	0
Cala	1.452	121	32	39	1.527
Brits	83	3	3	4	168

Apéndice IV

Resultados obtenidos

En este documento se presentan los resultados de la solución óptima obtenida para el caso de estudio.

De la Figura 1 a la 6 se muestra la composición por fracción de los residuos generados en cada una de las obras, salvo para Ventura y Domus, en el horizonte de tiempo elegido. Conocer esta composición es importante ya que influye en los resultados obtenidos.

De la Figura 7 a la 18 se muestran los resultados obtenidos para la gestión de residuos en cada una de las obras, salvo para Ventura y Domus, en el horizonte de tiempo elegido.

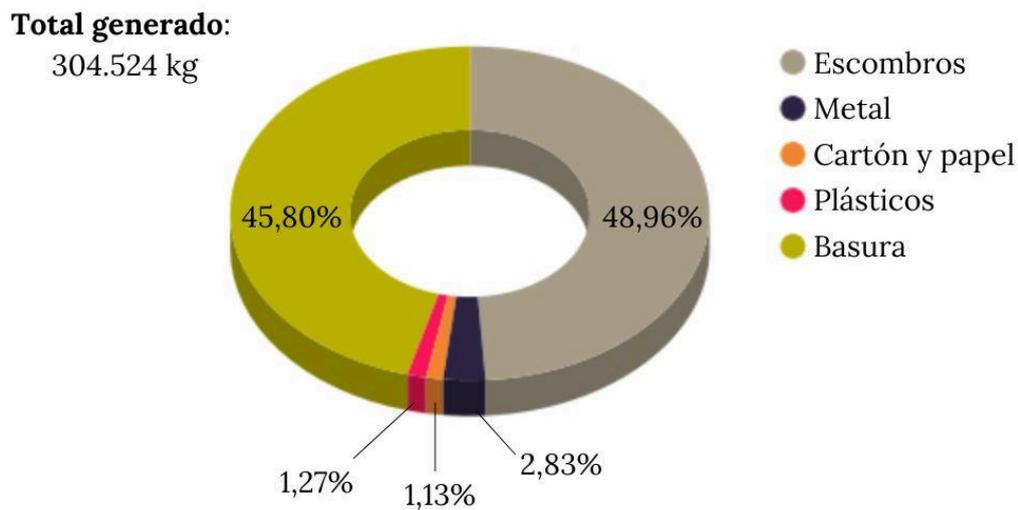


Figura 1 Composición por fracción de los residuos generados en porcentaje en MASMIO en el 2023. Fuente: Elaboración propia

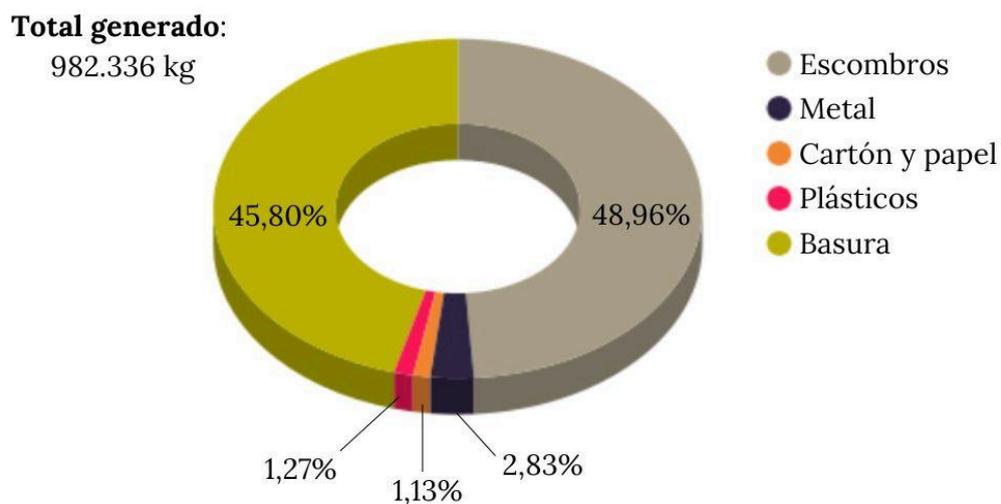


Figura 2 Composición por fracción de los residuos generados en porcentaje en More en el 2023. Fuente: Elaboración propia

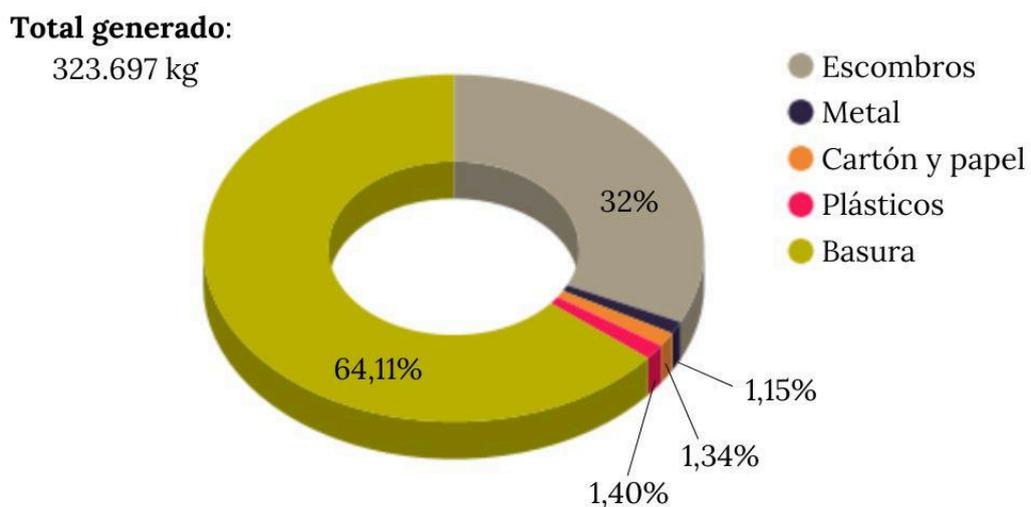


Figura 3 Composición por fracción de los residuos generados en porcentaje en Carrasco Valley en el 2023. Fuente: Elaboración propia

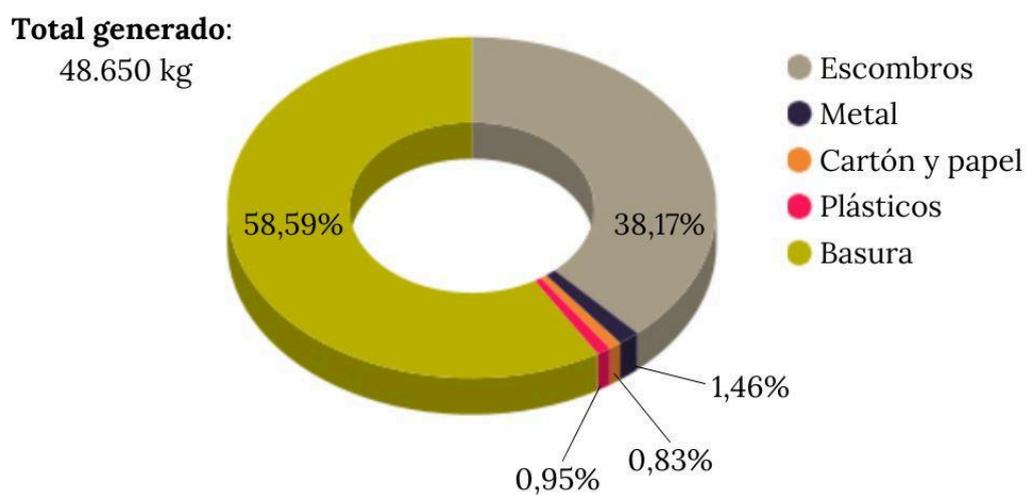


Figura 4 Composición por fracción de los residuos generados en porcentaje en PDLA3 en el 2023. Fuente: Elaboración propia

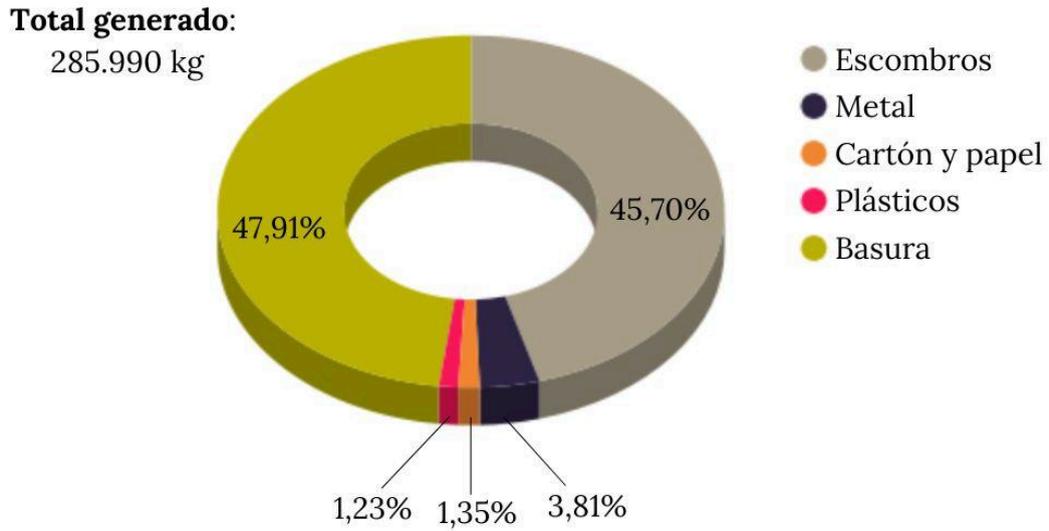


Figura 5 Composición por fracción de los residuos generados en porcentaje en Cala en el 2023. Fuente: Elaboración propia

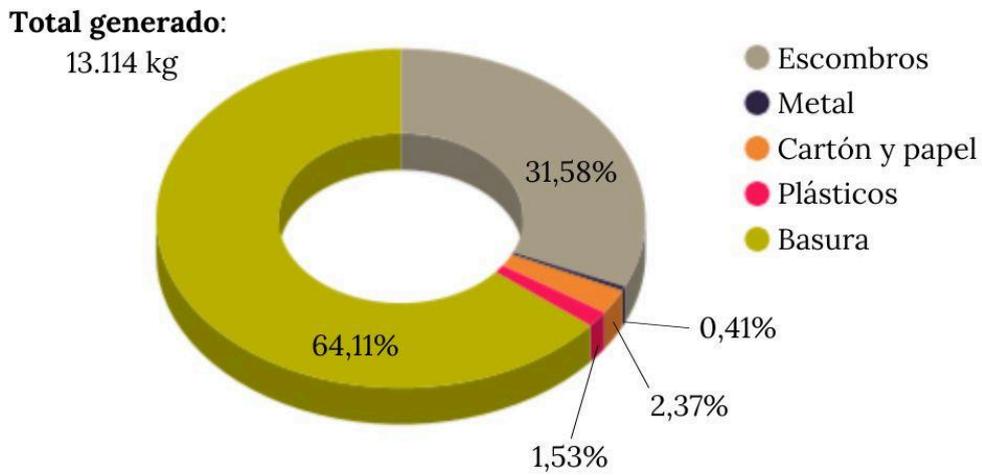


Figura 6 Composición por fracción de los residuos generados en porcentaje en Brits en el 2023. Fuente: Elaboración propia

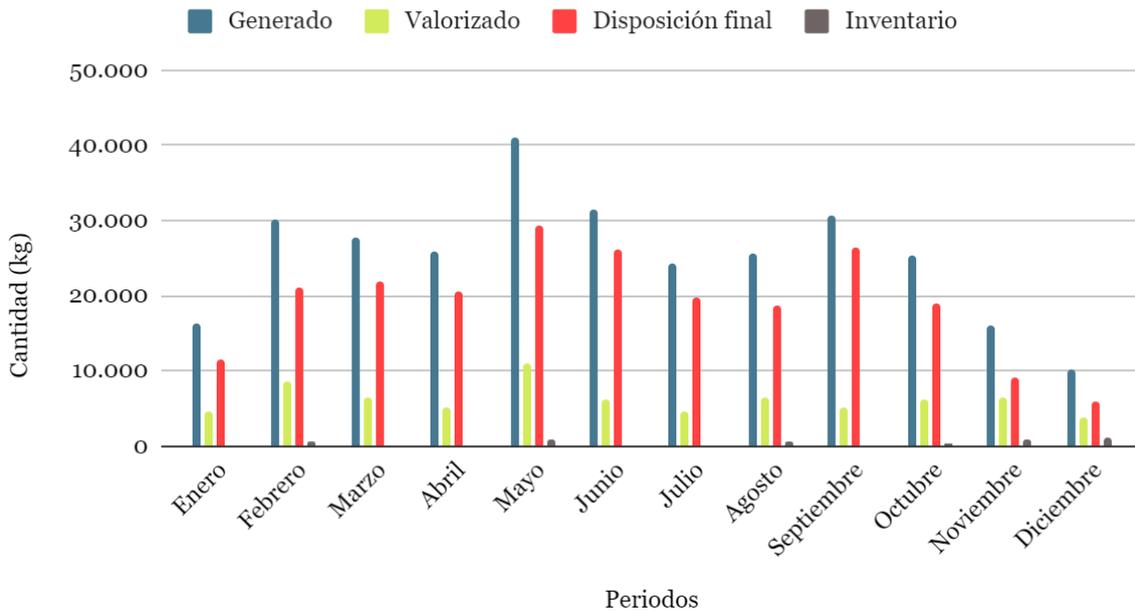


Figura 7 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en MASMIO en el 2023. Fuente: Elaboración propia

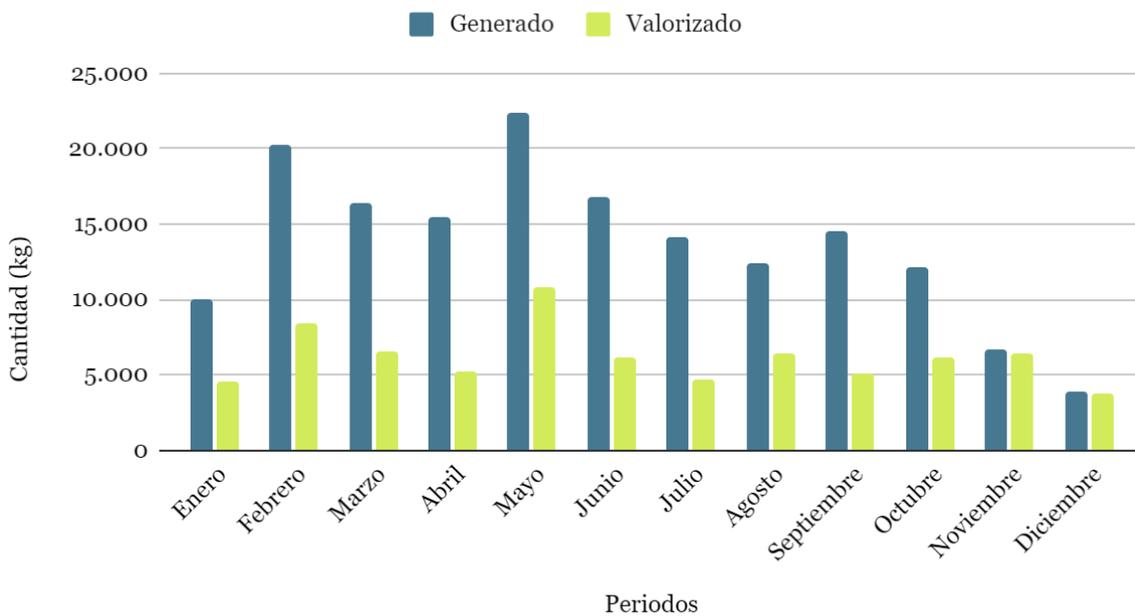


Figura 8 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en MASMIO 2023. Fuente: Elaboración propia

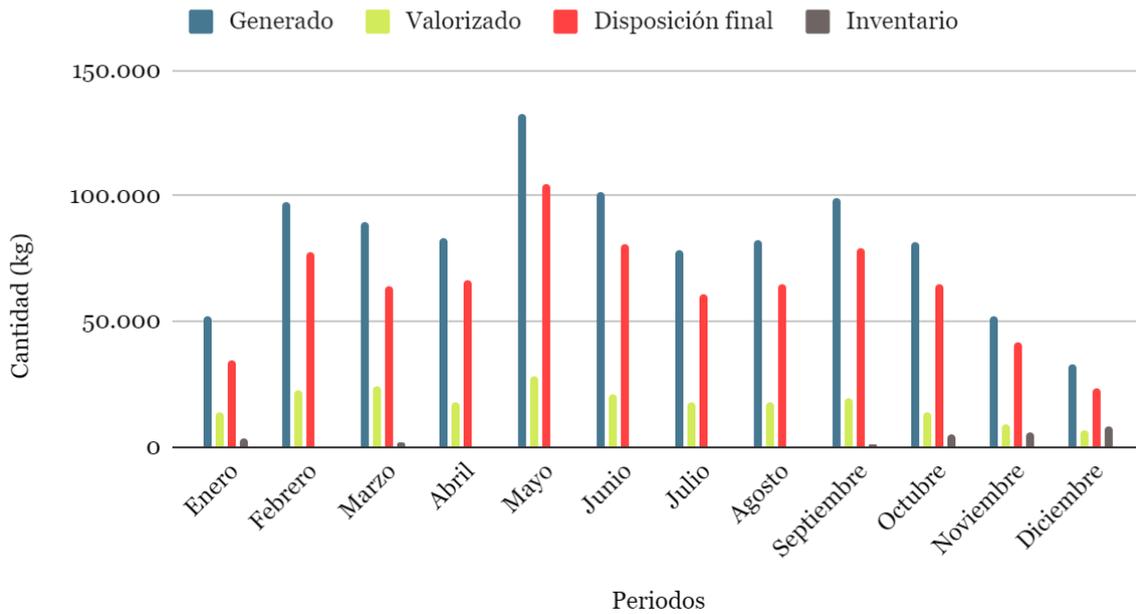


Figura 9 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en More en el 2023. Fuente: Elaboración propia

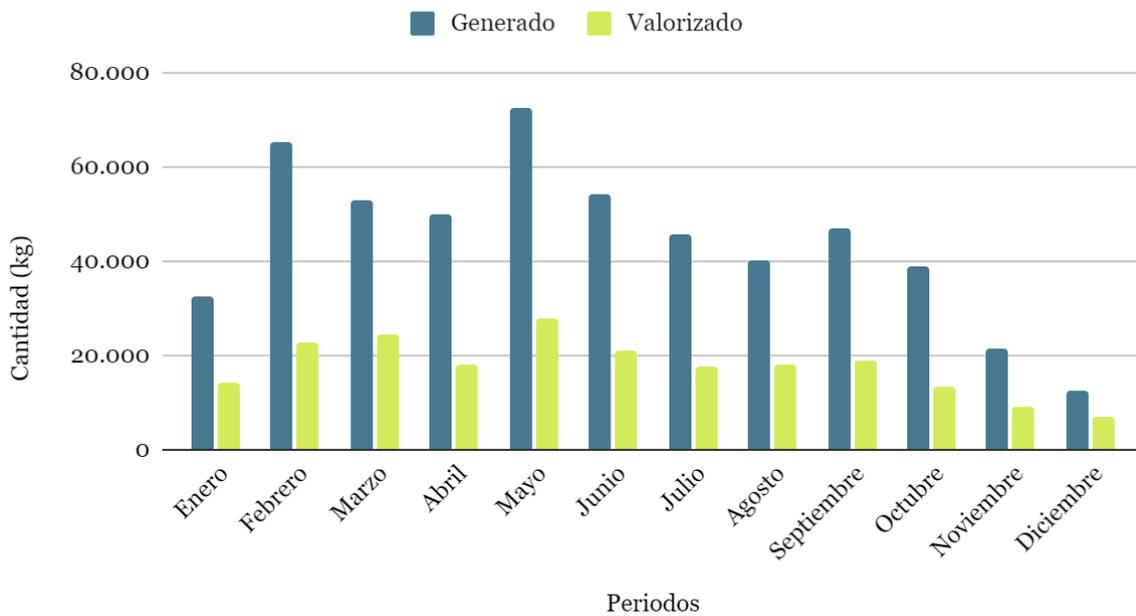


Figura 10 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en More 2023. Fuente: Elaboración propia

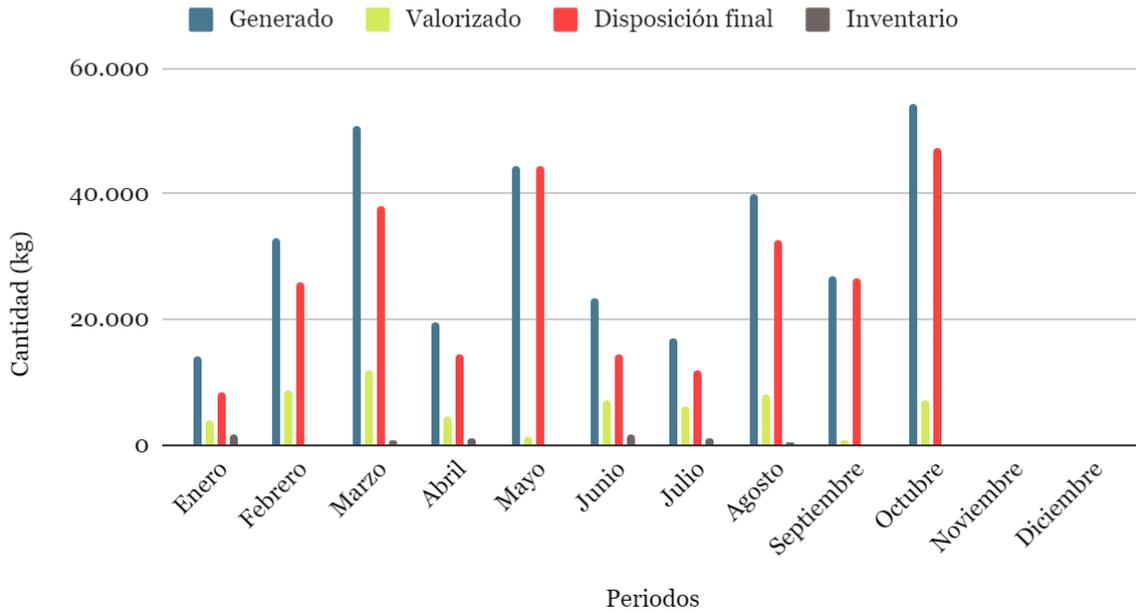


Figura 11 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en Carrasco Valley en el 2023. Fuente: Elaboración propia

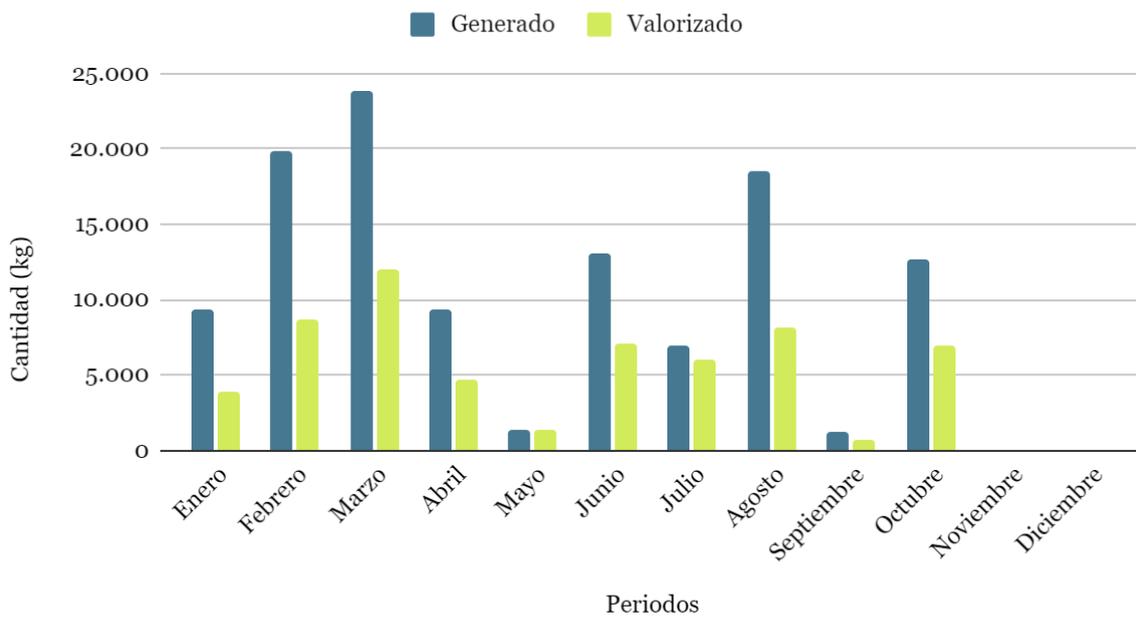


Figura 12 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en Carrasco Valley 2023. Fuente: Elaboración propia

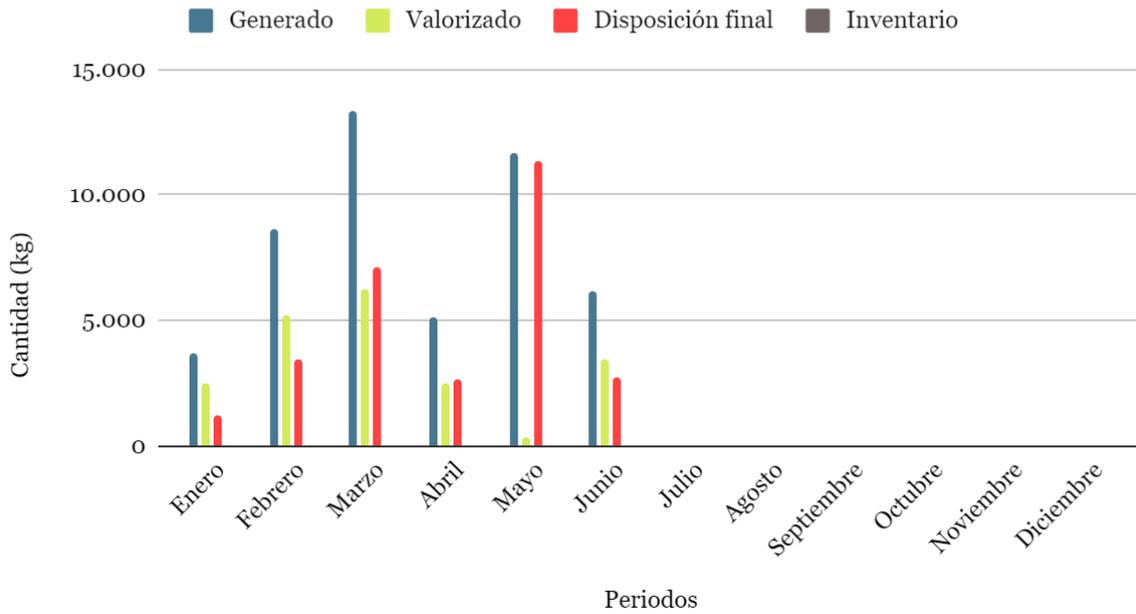


Figura 13 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en PDLA3 en el 2023. Fuente: Elaboración propia

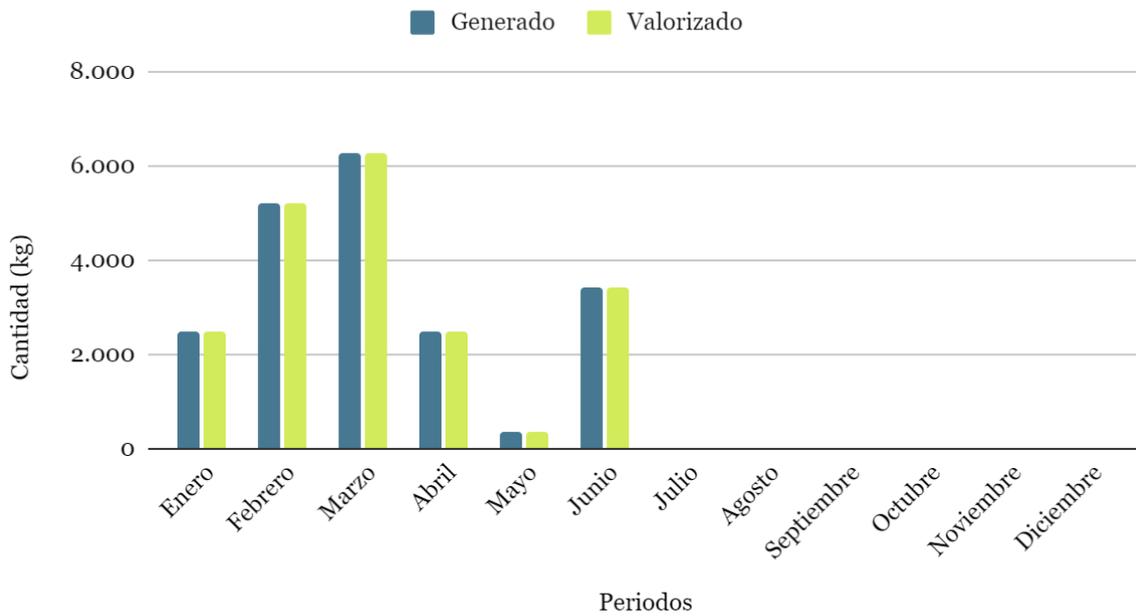


Figura 14 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en PDLA3 2023. Fuente: Elaboración propia

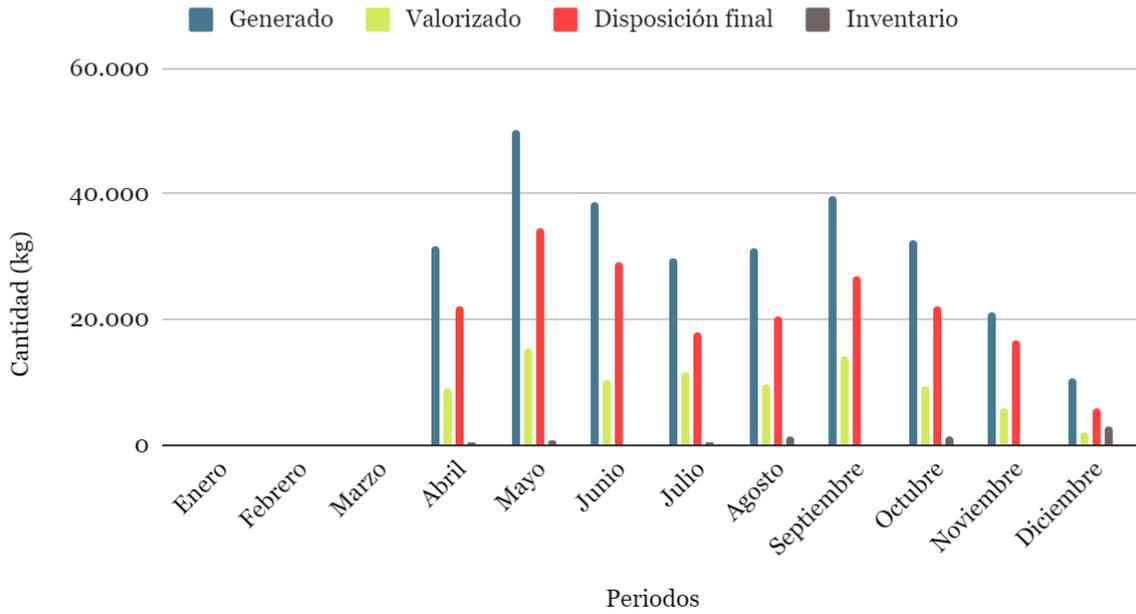


Figura 15 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en Cala en el 2023. Fuente: Elaboración propia

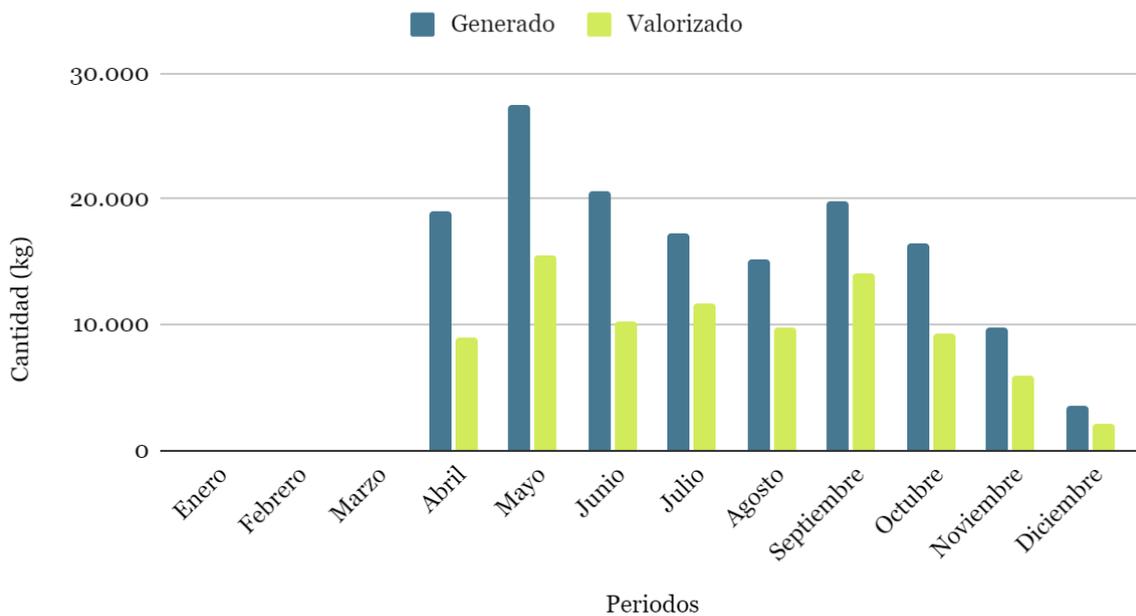


Figura 16 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en Cala 2023. Fuente: Elaboración propia

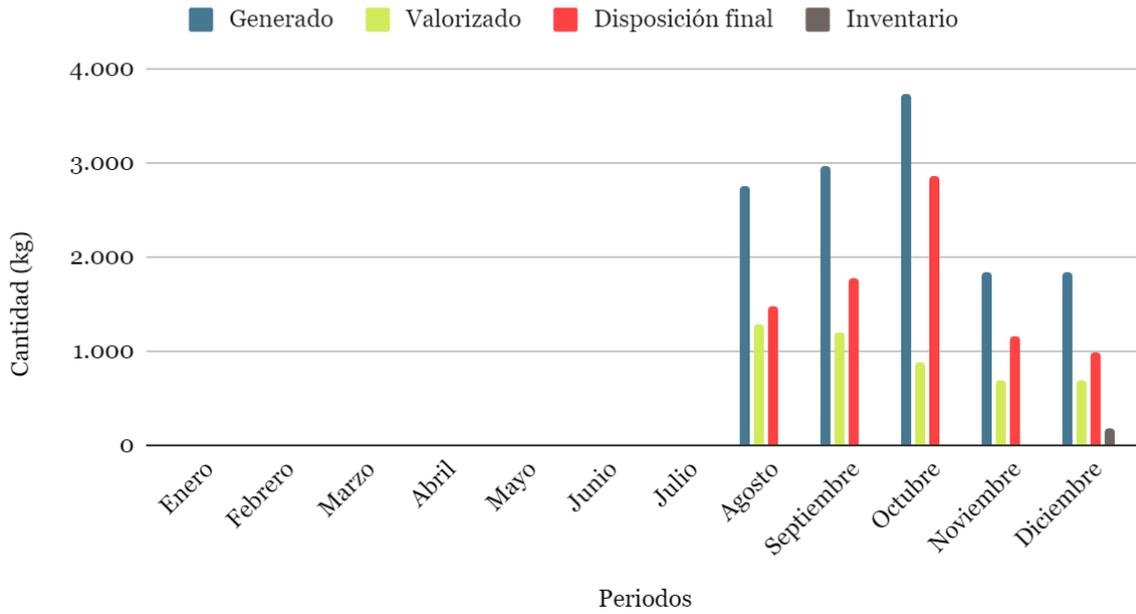


Figura 17 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados en Brits en el 2023. Fuente: Elaboración propia

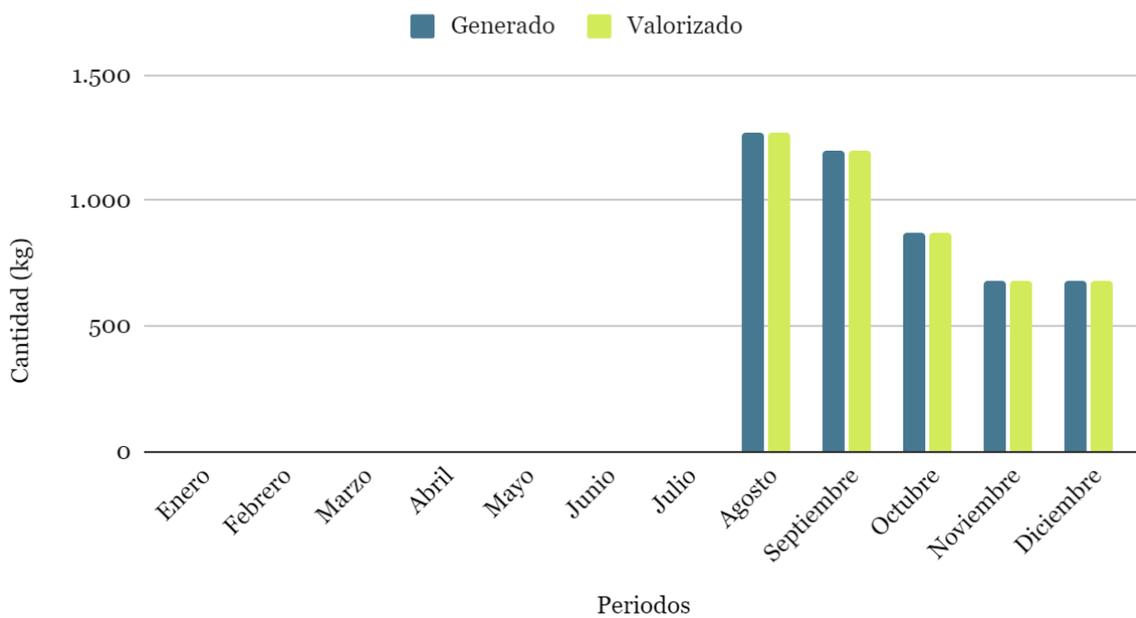


Figura 18 Resultados obtenidos para la gestión de residuos generados con posibilidad de valorización en Brits 2023. Fuente: Elaboración propia