



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGÍA, INFRAESTRUCTURA Y
TERRITÓRIO (ILATIT)**

INGENIERÍA CIVIL DE INFRAESTRUCTURA

**ANÁLISIS MULTICRITERIO EN GIS PARA LOCALIZACIÓN DE UNA USINA
DE RECICLAJE DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN
RCD EN EL MUNICIPIO DE TOLEDO – PARANÁ**

CAMILA RAQUEL TREPOWSKI RIOS

Foz do Iguaçu
2026



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGÍA, INFRAESTRUTURA Y
TERRITÓRIO (ILATIT)**

INGENIERÍA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**ANÁLISIS MULTICRITERIO EN GIS PARA LOCALIZACIÓN DE UNA USINA
DE RECICLAJE DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN
RCD EN EL MUNICIPIO DE TOLEDO – PARANÁ**

CAMILA RAQUEL TREPOWSKI RIOS

Trabajo de Conclusión de Curso
presentado al Instituto Latino-
Americano de Tecnología,
Infraestructura y Territorio de la
Universidade Federal da Integração
Latino-Americana, como requisito
parcial de la obtención del título de
Bacharel em Engenharia Civil de
Infraestrutura.

Orientadora: Prof. Mara Rubia Silva

Foz do Iguaçu
2026

CAMILA RAQUEL TREPOWSKI RIOS

**ANÁLISIS MULTICRITERIO EN GIS PARA LOCALIZACIÓN DE UNA USINA
DE RECICLAJE DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN y DEMOLICIÓN
RCD EN EL MUNICIPIO DE TOLEDO – PARANÁ**

Trabajo de Conclusión de Curso
presentado al Instituto Latino-
Americano de Tecnología,
Infraestructura y Territorio de la
Universidad Federal da Integração
Latino-Americana, como requisito
parcial de la obtención del título
Bacharel em Engenharia Civil de
Infraestrutura

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof. Mara Rubia Silva
(UNILA)

Prof. Dr. Cesar Winter de Melo
(UNILA)

Prof. Dr. Noé Villegas Flores
(UNILA)

Foz do Iguaçu, 10 de julho de 2026.

Dedico este trabajo a todas las personas que, desafiando las circunstancias, un día soñaron con acceder a la educación superior y estudiar.

A cada estudiante que, en medio del camino, abrumado por el cansancio o las dificultades, dudó de su propia capacidad y de sus fuerzas, pero eligió seguir adelante.

Y, muy especialmente, a todos aquellos que miran de lejos un título universitario como un anhelo inalcanzable. A todos ellos quiero decirles, con este logro como testigo, que sí es posible; que las barreras se rompen con persistencia y que nunca, bajo ninguna circunstancia, debemos dejar de permitirnos soñar alto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios, quien a lo largo de estos años me otorgó la fuerza necesaria para seguir adelante y me acompañó fielmente en las largas noches de desvelo y estudio.

A mi mamá, Nylsse Ríos, porque sin ella nada de todo esto sería posible; fue la primera persona en impulsarme siempre a continuar, creyendo en mí en cada momento. ¡Este logro es nuestro, mami!

A mi papá, Humberto, y a mi padrastro, Alberto, por estar presentes a lo largo de este camino, brindándome su apoyo en los momentos clave y dándome la firmeza para seguir avanzando.

A mis hermanos, Sergio, Tania, Iván y Guadalupe, quienes estuvieron presentes a lo largo de los años, apoyándome incondicionalmente en cada etapa y transmitiendo la energía para no decaer.

A mis hijos, Santiago y Sofía, quienes son, sin duda alguna, el motor que me impulsa día a día a ser una mejor persona y el motivo principal para querer seguir creciendo profesionalmente siempre.

A mi compañero de vida, Rafa, porque su apoyo constante y su comprensión fueron pilares fundamentales para que este sueño hoy sea una realidad.

A mi Tata, por estar siempre presente a través de su cocina; por esos momentos en los que extrañaba estar en casa y me enviaba comida para sostenerme en el día a día, llenándome el corazón y dándome fuerzas para continuar.

A mi profesora orientadora, Mara, por su guía, su rigor técnico y su paciencia, pero sobre todo por darme ese empujón definitivo que tanto faltaba para concluir este curso y apoyarme con firmeza en esta última etapa. Su voto de confianza fue clave para consolidar este proyecto.

A las profesoras y profesores Ana Carolina, Katia, Edna, Noé, César, Jiam y Ricardo, quienes, a lo largo de la carrera, y muchas veces sin siquiera saberlo, se convirtieron en una verdadera fuente de inspiración para mí, guiándome con su ejemplo y pasión por la enseñanza.

A las personas que en el ámbito laboral confiaron en mí y me instruyeron, Eduardo y María, por abrirme las puertas en su equipo y por cada

una de sus enseñanzas; su guía y experiencia no solo me aportaron muchísimo en el día a día del trabajo, sino que potenciaron enormemente mi crecimiento profesional.

A mis amigos de la universidad, Adriana, Tatiana, Soledad, Flavia, Eduardo, Sergio y Rocío, con quienes caminé a la par a lo largo de estos años de estudio. Cada uno de ustedes, con su alegría, su apoyo mutuo y su compañerismo en las aulas, hizo que este desafiante camino universitario fuera muchísimo más leve.

A todos ellos, mi más profunda y eterna gratitud.

*“Hay una fuerza motriz más poderosa que
el vapor, la electricidad y la energía
atómica: la voluntad”*

Albert Einstein

RESUMEN

La generación masiva de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) exige el planeamiento y la instalación de plantas de reciclaje urbanas para evitar vertederos clandestinos y recuperar materiales. En este escenario, el municipio de Toledo, Paraná, destaca por su acelerado crecimiento inmobiliario y desarrollo de infraestructura, lo que vuelve indispensable planificar su ordenamiento ambiental de forma estratégica. Por eso este trabajo buscó identificar el lugar ideal para instalar una planta de reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el municipio de Toledo, Paraná, mediante el análisis multicriterio y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo principal consistió en encontrar áreas aptas y seguras legalmente que reduzcan los costos del transporte pesado, ya que el éxito económico de estos proyectos depende de la logística, cuidando siempre los factores ambientales. Para la metodología, se utilizó el *software* QGIS en el Sistema Cartográfico de Referencia SIRGAS 2000 UTM 22S. En el modelo se analizaron cuatro criterios claves con los pesos asignados un 50% a la cercanía de las carreteras, un 20% a la distancia de los ríos, un 15% a las pendientes del terreno y otro 15% al uso y ocupación del suelo. Para proteger legalmente el mapa, se aplicó un filtro estricto basado en el Plan Regulador de Toledo. Esta restricción descartó por completo (dejando en valor cero) todas las zonas residenciales, comerciales, universitarias y las áreas del aeropuerto, de modo que el modelo habilitó únicamente los sectores de industrias y que permiten servicios pesados. Los resultados demostraron que el modelo de mapas funciona para marcar con precisión zonas óptimas en las afueras de la ciudad. Estas áreas alcanzaron una nota de 9.7 sobre 10, lo que asegura una buena conexión logística y protege el medio ambiente. El modelo respetó las normas locales, evitó problemas por ruido o polvo dentro de la ciudad y mostró ser una herramienta clara y fácil de repetir para planificar la infraestructura ambiental de la región

Palabras-clave: Planta de reciclaje; Residuos de Construcción y Demolición (RCD); Análisis Multicriterio; Sistema de Información Geográfica SIG.

RESUMO

A geração massiva de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) exige o planejamento e a instalação de plantas de reciclagem urbanas para evitar botaforas clandestinos e promover a recuperação de materiais. Neste cenário, o município de Toledo, Paraná, destaca-se pelo seu acelerado crescimento imobiliário e desenvolvimento de infraestrutura, tornando indispensável o planejamento estratégico do seu ordenamento ambiental. Diante disso, este trabalho buscou identificar o local ideal para a instalação de uma planta de reciclagem de RCD no município de Toledo, Paraná, por meio da análise multicritério (MCDA) e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). O objetivo principal consistiu em encontrar áreas aptas e juridicamente seguras que reduzam os custos do transporte pesado, — visto que o sucesso econômico desses projetos depende diretamente da logística —, mitigando simultaneamente os impactos ambientais. Para a metodologia, utilizou-se o *software* QGIS configurado no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), Projeção UTM Zona 22S. No modelo geoespacial, analisaram-se quatro critérios-chave com os seguintes pesos atribuídos: 50% para a proximidade das rodovias, 20% para a distância dos corpos hídricos, 15% para as declividades do terreno e 15% para o uso e ocupação do solo. Para garantir a conformidade legal do modelo, aplicou-se um filtro booleano restritivo baseado no Plano Diretor Municipal de Toledo. Esta restrição descartou por completo (atribuindo valor zero) a todas as zonas residenciais, comerciais, universitárias e as áreas patrimoniais do aeroporto, de modo que o modelo habilitou unicamente os setores industriais e de serviços pesados. Os resultados demonstraram a eficácia do modelo cartográfico para delimitar com precisão zonas ótimas nas periferias da cidade. Estas áreas alcançaram uma pontuação de 9,7 (em uma escala de 0 a 10), assegurando uma conectividade logística eficiente e a preservação ambiental. O modelo respeitou as normativas locais, evitou conflitos de vizinhança por ruído ou material particulado no núcleo urbano e provou ser uma ferramenta metodológica clara e replicável para o planejamento da infraestrutura ambiental na região.

Palavras-chave: Planta de reciclagem; Resíduos de Construção e Demolição (RCD); Análise Multicritério; Sistema de Informação Geográfica (SIG).

ABSTRACT

The massive generation of Construction and Demolition Waste (CDW) demands the strategic planning and installation of urban recycling plants to prevent illegal dumping and promote material recovery. In this scenario, the municipality of Toledo, Paraná, stands out due to its accelerated real estate growth and infrastructure development, making the strategic planning of its environmental zoning indispensable. Therefore, this study aimed to identify the optimal location for a CDW recycling plant in the municipality of Toledo, Paraná, using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and Geographic Information Systems (GIS). The primary objective was to find suitable and legally secure areas that minimize heavy transport costs—since the economic viability of these projects directly depends on logistics—while simultaneously mitigating environmental impacts. Regarding the methodology, QGIS software was utilized, configured in the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS 2000), UTM Projection Zone 22S. In the geospatial model, four key criteria were analyzed with the following assigned weights: 50% for proximity to highways, 20% for distance from water bodies, 15% for terrain slope, and 15% for land use and occupation. To guarantee the legal compliance of the model, a restrictive Boolean filter based on Toledo's Municipal Master Plan was applied. This restriction completely excluded (assigning a value of zero) all residential, commercial, and university zones, as well as airport property areas, thereby enabling the model to only approve industrial and heavy-service sectors. The results demonstrated the effectiveness of the cartographic model in accurately delimiting optimal zones in the outskirts of the city. These areas achieved a suitability score of 9.7 (on a scale from 0 to 10), ensuring efficient logistical connectivity and environmental preservation. The model respected local regulations, avoided neighborhood conflicts due to noise or particulate matter in the urban core, and proved to be a clear and replicable methodological tool for environmental infrastructure planning in the region.

Keywords: Recycling plant; Construction and Demolition Waste (CDW); Multi-Criteria Analysis; Geographic Information System (GIS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localización general y delimitación del área de estudio en el municipio de Toledo - PR.	42
Figura 2 - Flujograma metodológico del procesamiento espacial y álgebra de mapas.	51
Figura 3 - Mapa de Aptitud logística para el criterio de Carreteras	54
Figura 4 - Mapa de Aptitud Ambiental para el criterio de Recursos Hídricos.	56
Figura 5 - Mapa de Aptitud Topográfica para el criterio de Pendientes	57
Figura 6 - Mapa de Aptitud Urbanística para el criterio de Uso del Suelo.....	59
Figura 7 - Mapa Integrado de Factores Estandarizados.....	60
Figura 8 - Mapa de Aptitud Territorial Final con Aplicación del Filtro Booleano Urbanístico	61
Figura 9 - Mapa de delimitación del área óptima escogida para la planta de RCD	62

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (Asociación Brasileña de Normas Técnicas).

AHP Analytic Hierarchy Process (Proceso de Análisis Jerárquico).

ANA Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Agencia Nacional de Aguas de Brasil).

APP Área de Preservação Permanente (Área de Preservación Permanente).

CBR *California Bearing Ratio* (Índice de Soporte California).

CDW *Construction and Demolition Waste* (Sigla en inglés para RCD).

CI *Consistency Index* (Índice de Consistencia).

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente (Consejo Nacional del Medio Ambiente de Brasil).

CR Consistency Ratio (Razón de Consistencia).

DER-PR Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (Departamento de Carreteras del Estado de Paraná).

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes).

GeoToledo Sistema de Información Geográfica Oficial de la Municipalidad de Toledo.

GIS Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica - SIG).

IAG Índice de Adequabilidade Global.

IAT Instituto Água e Terra do Paraná.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Instituto Brasileño de Geografía y Estadística).

ILATIT Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território.

IPTU Imposto Predial e Territorial Urbano (Impuesto Predial y Territorial Urbano).

ITBI Imposto de Transmissão de Bens Imóveis (Impuesto de Transmisión de Bienes Inmuebles).

MCDA Multi-Criteria Decision Analysis (Análisis Multicriterio de Decisión).

MDE Modelo Digital de Elevación.

MTR Manifesto de Transporte de Resíduos (Manifiesto de Transporte de Residuos).

MPa Megapascal (Unidad de presión/resistencia mecánica).

PGRCC Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (Plan de Gestión de Residuos de la Construcción Civil).

PGV Planta Genérica de Valores.

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos (Política Nacional de Residuos Sólidos).

PVC Policloruro de Vinilo.

RCD/RCC Residuos de Construcción y Demolición / Resíduos de Construção Civil.

RI *Random Index* (Índice Aleatorio).

SIG Sistema de Información Geográfica.

TCC Trabajo de Conclusión de Curso.

UNILA Universidad Federal de la Integración Latinoamericana.

UTM *Universal Transverse Mercator* (Universal Transversa de Mercator).

WLC *Weighted Linear Combination* (Combinación Lineal Ponderada)

SUMARIO

1	INTRODUCCIÓN	16
1.1	Objetivo general	17
1.1.1	Objetivos específicos.....	17
1.2	Justificativa.....	18
1.3	Limitaciones del estudio.....	19
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Gestión y valorización de RCD.....	21
2.1.1	Concepto y clasificación de RCD	21
2.1.2	La economía circular y el reciclaje de RCD.....	24
2.1.3	Logística inversa de residuos pesados.....	26
2.2	Localización industrial y análisis multicriterio (MCDA).....	28
2.2.1	Teoría de localización de infraestructuras.....	28
2.2.2	Fundamentos del análisis multicriterio espacial (MCDA).....	29
2.2.3	El proceso de análisis jerárquico (AHP) y su sustento matemático.....	30
2.2.4	Sistemas de información geográfica (SIG) y álgebra de mapas....	34
2.3	Marco normativo y de ordenamiento territorial en Brasil.....	35
2.3.1	Política nacional de residuos sólidos (PNRS) y el sector de RCD..	35
2.3.2	Restricciones ambientales, urbanísticas e ingenieriles.....	37
2.3.3	Dinámica urbana, crecimiento demográfico y expansión del municipio de Toledo.....	40
3	MATERIALES Y METODOS.....	42

3.1	Planteamiento y enfoque del trabajo.....	42
3.1.1	Fase de recolección de datos.....	43
3.1.2	Fase de atribución de pesos (AHP).....	43
3.1.3	Fase de filtro legal (Filtro booleano).....	44
3.1.4	Fase de cruce de datos.....	45
3.2	Materiales y bases de datos .utilizadas.....	45
3.3	Método de análisis multicriterio (AHP) y selección de parámetros.....	46
3.4	Unificación de escalas y criterios de calificación.....	49
3.5	Flujo de procesamiento de datos y arquitectura del modelo.....	50
4	DISCUSIONES Y RESULTADOS.....	52
4.1	Validación matemática del modelo multicriterio (AHP).....	52
4.2	Análisis geográfico de los criterios normalizados.....	53
4.2.1	Criterio de accesibilidad vial (carreteras).....	53
4.2.2	Criterio de recursos hídricos (ríos).....	55
4.2.3	Criterio de inclinación (pendientes).....	56
4.2.4	Criterio de uso y ocupación del suelo.....	58
4.3	Integración logística y aplicación del filtro booleano urbanístico	59
5	CONSIDERACIONES FINALES.....	64
5.1	Sugerencias para trabajos futuros.....	66
6	REFERENCIAS	67

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de las ciudades y las constantes obras de infraestructura generan hoy en día una cantidad crítica de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (SANTOS; FERREIRA, 2021), consolidando su gestión como un desafío ambiental urgente. En el escenario brasileño, este problema dejó de ser un simple manejo de desechos para convertirse en una obligación legal a partir de normativas federales que buscan eliminar los vertederos clandestinos y empujar la transición hacia la economía circular (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002). Estas leyes exigen que las administraciones municipales organicen el flujo de estos materiales y promuevan su reciclaje para transformarlos en agregados que vuelvan a ingresar al ciclo productivo (BRASIL, 2010).

Sin embargo, levantar una planta de reciclaje de RCD requiere una mirada estratégica en su ubicación, dado que mover carga pesada representa el gasto operativo más alto de toda la cadena (JÚNIOR; SOUZA, 2016). Instalar la planta muy lejos de los puntos donde se generan los residuos o de los ejes viales principales termina disparando los costos en combustible y mantenimiento, lo que puede tumbar la viabilidad del proyecto (RODRIGUES; SILVEIRA, 2020). Por eso, la planificación urbana necesita metodologías capaces de equilibrar la eficiencia logística con un blindaje ambiental y jurídico riguroso, adaptado al contexto local (IPARDES, 2015). Esto significa proteger los recursos hídricos, evaluar las pendientes del terreno y respetar al pie de la letra las áreas permitidas por el ordenamiento territorial (MUNICIPIO DE TOLEDO, 2018).

Bajo este panorama, combinar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el análisis multicriterio se vuelve la salida técnica ideal para cruzar capas espaciales con precisión matemática (SANTOS; SILVA, 2017). Estas tecnologías simplifican la tarea de ponderar variables operativas y ambientales que suelen chocar entre sí en el territorio (GOMES, 2018). De hecho, la literatura actual confirma que la modelación espacial es la ruta más segura para definir dónde ubicar estas infraestructuras de reciclaje (OLIVEIRA, 2019). Trabajar con

datos ráster en plataformas de *software* libre asegura que los mapas resultantes tengan el rigor que demanda un análisis de ingeniería (ALMEIDA, 2021).

Frente a esta realidad, esta investigación propone encontrar la localización óptima para una planta de reciclaje de RCD en el municipio de Toledo, Paraná, apoyándose en el *software* QGIS y evaluando factores logísticos, ambientales y urbanísticos. De forma específica, el trabajo busca normalizar las variables biofísicas de la zona, aplicar un filtro estricto con las prohibiciones legales del Plan Director y delimitar los sectores periféricos más aptos, entregando una base técnica real para ordenar el territorio (SOUZA; MELLO, 2022).

1.1 Objetivo general

Aplicar técnicas de análisis multicriterio combinado con Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el fin de proponer el lugar óptimo para instalar una planta de reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el municipio de Toledo, Paraná.

1.1.1 Objetivos Específicos

1. Consolidar la base de datos espaciales del municipio de Toledo a partir de levantamientos cartográficos oficiales, estandarizando los planos de información vectoriales y matriciales dentro del entorno del *software* QGIS.
2. Categorizar los intervalos numéricos y espaciales de los cuatro criterios seleccionados (vías, pendientes, uso de suelo y ríos) mediante un sistema de calificaciones de 0 a 10 para determinar su nivel de adecuación territorial.
3. Ponderar la relevancia de cada parámetro geográfico mediante la formulación de una matriz de comparación en parejas bajo el

enfoque AHP, asegurando la validación del modelo a través de los índices de consistencia matemática.

4. Mapear las superficies de aptitud territorial en formato ráster mediante operaciones de álgebra de mapas, identificando los sectores con puntuaciones más elevadas para albergar la planta de RCD.

1.2 Justificativa

La acumulación masiva de escombros en las ciudades exige que la ingeniería civil y la gestión pública dejen de improvisar y utilicen métodos científicos para planificar su territorio de forma sostenible. Aunque la normativa brasileña obliga a valorizar los residuos pesados, la localización de una planta de reciclaje de RCD suele decidirse de forma arbitraria, ignorando que las variables de transporte, relieve y zonificación chocan constantemente en el territorio (MARCHESI *et al.*, 2018). Esta problemática estructural se agrava debido a que la degradación ambiental provocada por la extracción continua de agregados naturales vírgenes ejerce una presión insostenible sobre los ecosistemas regionales, convirtiendo la sustitución por agregados reciclados en una necesidad urgente de infraestructura y ordenamiento (BARBOSA; SILVA, 2023).

A nivel técnico, la investigación aborda el principal cuello de botella de la economía circular: los costos de acarreo de carga pesada. El transporte de escombros genera un alto consumo de combustible y emisiones que anularían el beneficio ecológico del reciclaje si la infraestructura se ubica de manera incorrecta (RODRIGUES; SILVEIRA, 2020). Desde la perspectiva de la ingeniería de transportes, la eficiencia de una planta de procesamiento depende de la minimización de la fricción de la distancia y los tiempos de viaje de vehículos pesados, factores que impactan directamente en el costo operativo (OPEX) del sistema de limpieza urbana (FERREIRA; GOMES, 2024). Por lo tanto, la integración de matrices pareadas en un entorno SIG mitiga la subjetividad en la toma de decisiones, blindando la selección de alternativas desde un enfoque riguroso, matemático y legal (MARTINS, 2022).

A nivel local, el municipio de Toledo, Paraná, es un escenario prioritario debido a su notable crecimiento demográfico y económico. Según datos oficiales del

IBGE, su población experimentó un incremento superior al 30% en los últimos periodos censales, superando los 150.000 habitantes (IBGE, 2022). Este auge genera un fuerte dinamismo constructivo que posiciona a Toledo en los primeros lugares de empleo formal en el sector (TOLEDO, 2026), pero también propicia la aparición de pasivos ambientales en las periferias (SOUZA; MELLO, 2022) y una demanda crítica de áreas aptas que detengan la saturación de los vertederos municipales (SILVA; OLIVEIRA, 2024)

Por lo tanto, este trabajo se justifica al alinear el análisis geográfico en QGIS con el Plan Director municipal (MUNICIPIO DE TOLEDO, 2018) y el método AHP (ALMEIDA, 2021) para aportar un modelo técnico, replicable y consistente capaz de resolver una demanda real de ingeniería e infraestructura civil en la región.

1.3 Limitaciones del estudio

A pesar del rigor metodológico en la estructura del modelo geoespacial, se reconoce la existencia de limitaciones técnicas inherentes al proceso:

- **Naturaleza estática del modelado de generación de residuos:** El modelo espacial desarrollado opera bajo un enfoque estático y fijo. En este sentido, se reconoce que no se incorporó la dinámica espacio-temporal de los focos de generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Esto implica la exclusión de variables altamente variables en el tiempo, tales como los frentes de obra activos, las licencias de construcción vigentes o las proyecciones específicas de los barrios con mayor tasa de expansión inmobiliaria actual y futura dentro del municipio.
- **Simplificación del análisis de accesibilidad vial:** La evaluación de la infraestructura de transporte se limitó a la determinación de distancias euclidianas hacia los ejes viales principales, asumiendo un análisis geométrico estático. Por consiguiente, se reconoce que no se incorporaron variables dinámicas de flujo vehicular, tales como los tiempos de viaje reales en periodos de máxima demanda (horas pico), la velocidad de operación de la red, los puntos de congestión vial ni los cuellos de botella presentes en la trama urbana del municipio.
- **Ausencia de caracterización geotécnica local:** El análisis espacial desarrollado no incorporó parámetros geotécnicos in situ, tales como ensayos mecánicos para la determinación de la capacidad de carga del

suelo, perfiles estratigráficos ni la profundidad del nivel freático en las zonas seleccionadas como óptimas. Se reconoce que la recopilación de estas propiedades resulta de carácter obligatorio para etapas posteriores de ingeniería de detalle, siendo indispensables para el diseño estructural de las fundaciones, cimentaciones de maquinaria pesada y pavimentos de hormigón rígido de la planta de recicla

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Gestión y Valorización del RCD

2.1.1 Concepto y Clasificación De RCD

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) —denominados formalmente en el entorno técnico-científico brasileño como “Resíduos de Construção Civil (RCC)” o coloquialmente como “escombros”, — constituyen una de las corrientes de residuos sólidos más complejas, voluminosas y heterogéneas generadas en los entornos urbanos contemporáneos (SOUZA *et al.*, 2021). Desde una perspectiva técnica e ingenieril, estos residuos comprenden todos aquellos fragmentos, componentes, tierras de excavación y materiales sobrantes resultantes de las actividades directas o indirectas de desbroce, excavación, cimentación, edificación nueva, reformas arquitectónicas, ampliaciones estructurales, demoliciones de edificaciones y reparaciones de infraestructuras viales o de saneamiento (ANGELIS *et al.*, 2021).

A nivel internacional, la Directiva Marco de Residuos de la Unión Europea (Directiva 2008/98/CE) conceptualiza estos flujos bajo un enfoque macroeconómico, catalogándolos como una corriente prioritaria debido a su alta tasa de generación masiva y a la necesidad crítica de incentivar la demolición selectiva, la separación en origen y la valorización de fracciones limpias (HUANG *et al.*, 2021).

En el territorio brasileño, la definición formal y la categorización operativa de estos materiales están rígidamente estipuladas por la Resolución nº 307 del Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), publicada en el año 2002. Esta resolución histórica rompió el viejo paradigma de considerar al escombro como un desecho inerte y uniforme, obligando al sector de la construcción civil a segregar los residuos en la propia obra según sus propiedades fisicoquímicas, su nivel de peligrosidad y su viabilidad de reciclaje industrial. La legislación clasifica los RCD en cuatro grandes clases operacionales:

- Clase A: Residuos reutilizables o reciclables directamente como agregados en la construcción civil. Esta fracción, netamente mineral, está compuesta por componentes cerámicos (ladrillos, bloques de arcilla, tejas, azulejos), componentes de hormigón (bloques, restos de vigas, columnas, pavimentos), hormigón estructural preparado en obra, morteros de cemento y cal, piedras naturales y suelos procedentes de excavaciones y movimientos de tierra no contaminados. Al poseer una naturaleza triturable y mecánicamente estable, la Clase A representa la materia prima principal (*target*) que alimenta las tolvas de las plantas de trituración y reciclaje objeto de este estudio.
- Clase B: Residuos reciclables destinados a otros ciclos productivos o cadenas de reciclaje industrial fuera del uso directo como agregado mineral crudo. Esta categoría abarca materiales altamente reutilizables como plásticos (tuberías de PVC, películas de polietileno), cartón, papel de embalaje, metales ferrosos y no ferrosos (varillas de acero, perfiles de aluminio, cables de cobre), vidrio templado o común, maderas de encofrado y andamiaje, y el yeso. Cabe destacar que el yeso fue reclasificado formalmente por la Resolución CONAMA nº 431/2011, pasando de la Clase C a la Clase B, debido al desarrollo de tecnologías de calcinación que permiten su reincorporación industrial, siempre que se evite su degradación anaerobia junto a materia orgánica, la cual genera gas sulfhídrico.
- Clase C: Residuos para los cuales aún no se han desarrollado tecnologías viables o aplicaciones económicas a gran escala que permitan su recuperación, valorización o reciclaje eficiente bajo el estado del arte actual. Se incluyen en esta clase materiales como las mantas asfálticas impermeabilizantes antiguas, lana de vidrio, paneles de fibra de vidrio, lana de roca y ciertos productos de aislamiento termo acústico complejo. La normativa exige que estos materiales sean almacenados temporalmente o dispuestos en vertederos autorizados asegurando su confinamiento.
- Clase D: Residuos de naturaleza peligrosa originados en los procesos constructivos, de remodelación o de demolición industrial. Esta fracción comprende todos aquellos materiales que, por sus características de

toxicidad, inflamabilidad, corrosividad o reactividad, representan un riesgo inminente para la salud pública y el equilibrio ambiental. Ejemplos críticos incluyen las placas y tejas de cemento-amianto (asbesto), tubos y latas de pintura a base de plomo o solventes orgánicos, barnices, resinas epóxicas, aceites hidráulicos de maquinaria, maderas tratadas con compuestos de arsénico o cromo (preservantes CCA), tierras contaminadas por hidrocarburos y componentes estructurales provenientes de instalaciones industriales químicas o clínicas radiológicas. La Clase D exige un protocolo estricto de manifiesto de transporte de residuos (MTR) y su disposición final obligatoria en vertederos industriales de Clase I.

En municipios de mediana escala (aquellos que ostentan un contingente poblacional comprendido entre los cien mil y los quinientos mil habitantes, y que típicamente actúan como centros de atracción inmobiliaria, polos de inversión agroindustrial y nodos logísticos regionales, como es el caso de Toledo, en la región Oeste del Estado de Paraná) el comportamiento de las tasas de generación de RCD muestra una dinámica de correlación directa con las fluctuaciones macroeconómicas, el crecimiento vertical de la ciudad y la ejecución de obras públicas de saneamiento y pavimentación (ANGELIS *et al.*, 2021).

Estudios experimentales y diagnósticos de gestión integral ejecutados en municipios con perfiles sociodemográficos homólogos demuestran que la generación per cápita específica se sitúa en un rango promedio que oscila entre los 0.5 kg/hab x día a 1.2 kg/hab x día (SANTOS *et al.*, 2019). Este valor, aparentemente marginal a escala individual, se traduce en una acumulación masiva de decenas de miles de toneladas métricas anuales a nivel municipal, saturando rápidamente las capacidades de recolección tradicionales.

Asimismo, la caracterización gravimétrica e histórica de esta masa residual revela que la fracción mineral (Clase A) mantiene una hegemonía absoluta, representando entre el 70% y el 85% del peso bruto total de los escombros que ingresan al sistema de recolección formal e informal (MADI; SROUR, 2019). Este predominio de compuestos inertes basados en sílice, alúmina y carbonatos

proporciona el sustento científico fundamental para la viabilidad de la ingeniería de reciclaje mecánico, asegurando que el flujo de entrada a la planta procesadora sea volumétricamente predecible, químicamente estable y de alto valor como sustituto de los agregados naturales de cantera.

2.1.2 La Economía Circular y El Reciclaje De RCD

El agotamiento acelerado de las reservas naturales de áridos y el impacto ambiental derivado de la minería a cielo abierto han forzado a la ingeniería civil moderna a adoptar directrices basadas en la Economía Circular. Este enfoque conceptual sustituye la noción tradicional del residuo como un elemento inservible que debe confinarse al final de una cadena lineal, transformándolo en un recurso tecnológico reactivado que fluye en ciclos cerrados continuos (HUANG *et al.*, 2021). Al aplicar los principios de la economía circular sobre los RCD de Clase A, el material es sometido a un proceso de trituración primaria y secundaria, separación magnética de armaduras férreas, eliminación densimétrica de contaminantes ligeros (maderas, papeles) y clasificación granulométrica por cribado, dando origen a los denominados agregados reciclados.

El uso de agregados reciclados de base mineral constituye una alternativa de alto rendimiento ambiental, ya que reduce la necesidad de abrir nuevos frentes de explotación minera para la extracción de basalto, granito o arenas de río, actividades que degradan de forma severa el paisaje, alteran los lechos hídricos y conllevan una alta huella de carbono asociada al transporte de materiales vírgenes (SOUZA *et al.*, 2021).

Desde la perspectiva microestructural y de la mecánica de materiales, la literatura científica ha evidenciado que el agregado reciclado posee características intrínsecas que lo diferencian del agregado natural. La principal propiedad distintiva es la presencia de la pasta de mortero antiguo adherida a las superficies del grano original de agregado natural (SANTOS *et al.*, 2019). Esta matriz cementicia residual confiere al agregado reciclado una mayor porosidad intergranular, una densidad aparente ligeramente menor (reducción

de entre el 5% y el 10%) y un índice de absorción de agua significativamente superior (pudiendo alcanzar valores de entre el 4% y el 12%, frente al <2% de los agregados convencionales).

No obstante, mediante técnicas adecuadas de dosificación, control de la relación agua/cemento y pre-saturación de los agregados, el desempeño mecánico de estos subproductos es óptimo para una amplia gama de aplicaciones de ingeniería urbana, debidamente normadas en Brasil bajo la directriz ABNT NBR 15116 (Agregados reciclados de residuos sólidos de la construcción civil - Utilización en pavimentación y preparación de hormigón sin función estructural). Las principales aplicaciones tecnológicas validadas incluyen:

- Capas de Base y Sub base de Pavimentos: Los agregados reciclados mixtos (cerámicos-hormigón) o puramente de hormigón demuestran un excelente comportamiento bajo cargas cíclicas debido a su elevado ángulo de fricción interna y al fenómeno de "recementación latente", donde las partículas de cemento anhidro remanentes reaccionan ante la presencia de agua de compactación, incrementando el Índice de Soporte California (CBR) del conjunto estabilizado.
- Hormigón Sin Función Estructural y Morteros de Relleno: Elaboración de hormigón de limpieza, contrapisos, bases de aceras públicas, cordones de cuneta y elementos de amoblamiento urbano expuestos a solicitaciones de compresión moderadas (< 20MPa).
- Fabricación de Artefactos Premoldeados: Producción a escala industrial de adoquines de hormigón intertrabado (*pavers*) para tráfico peatonal ligero, bloques de mampostería no portante y canaletas de coronación para la disipación de energía de escorrentías.
- Ingeniería de Suelos y Obras de Saneamiento: Utilización como material de préstamo para la estabilización de subrasantes blandas, relleno técnico de zanjas destinadas a la instalación de redes de agua potable o alcantarillado sanitario, y regularización de la rodadura en caminos vecinales y vías rurales no pavimentadas.

A la luz de estas aplicaciones, las plantas de reciclaje de RCD trascienden el viejo rol pasivo de centros de recepción y disposición para consolidarse

formalmente como infraestructuras sustentables de carácter estratégico (COBOS-MORA *et al.*, 2023). Estas instalaciones actúan como nodos de procesamiento de metabolismo urbano que no solo minimizan los pasivos ambientales, sino que reducen los costos operativos de los municipios al dotar a las secretarías de obras públicas de un suministro continuo de materiales de construcción a bajo costo, promoviendo la resiliencia de la infraestructura de las ciudades modernas.

2.1.3 Logística Inversa De Residuos Pesados

La viabilidad operativa y la sostenibilidad financiera de una planta de reciclaje de RCD están sujetas a una restricción física y logística rigurosa que condiciona todo el modelo de negocio: los escombros de la construcción civil se clasifican como un material de elevada densidad aparente y peso específico volumétrico, asociado a un bajo valor comercial intrínseco por tonelada métrica (ANGELIS *et al.*, 2021). A diferencia de otros materiales post-consumo de alto valor unitario (como el aluminio o el cobre), el agregado reciclado mineral compite directamente en el mercado con los precios relativamente bajos de los agregados naturales extraídos de canteras locales. Esta asimetría económica determina que el éxito del proyecto dependa críticamente de la estructuración del sistema de logística inversa.

La logística inversa en el ámbito de la construcción civil se define como el flujo inverso coordinado de materiales, componentes y subproductos que abarca desde las etapas de descarte en los frentes de obra (demolición, desperdicios o pérdidas) hasta los centros de acopio, estaciones de transferencia, plantas de valorización industrial o, en última instancia, sitios de disposición final ambientalmente adecuados (SOUZA *et al.*, 2021). En este ciclo, el transporte pesado constituye la variable operativa más crítica y sensible. Debido al elevado peso de la carga mineral, el transporte de RCD se realiza típicamente en camiones volquete de ejes simples, dobles o unidades articuladas de gran volumen, cuyos costos operativos de combustible, desgaste de neumáticos,

mantenimiento de suspensiones y depreciación de flota son sumamente elevados.

Matemáticamente, la variable de decisión económica dominante está definida por el costo unitario por tonelada-kilómetro transportada ($t \cdot km$) (HUANG *et al.*, 2021). A medida que la distancia geográfica entre los focos de generación de escombros y la planta de reciclaje aumenta, los costos de transporte escalan de forma lineal.

Existe un radio crítico de viabilidad económica, superado el cual los costos acumulados por flete superan por completo el valor comercial del agregado reciclado final producido en la planta, volviendo el proceso financieramente inviable y desincentivando a los constructores privados a transportar el residuo de forma legal (MADI; SROUR, 2019). Cuando esto ocurre, proliferan las descargas clandestinas de escombros en terrenos baldíos, fondos de valles y Áreas de Preservación Permanente, trasladando el costo ambiental al municipio.

Por lo tanto, el problema de ingeniería para la localización de estas instalaciones consiste en aproximar geográficamente la planta de reciclaje hacia el centro de gravedad de la generación de RCD, minimizando los tiempos de ciclo y el recorrido de los vehículos de carga. Sin embargo, esta aproximación espacial encuentra barreras estrictas asociadas al elevado costo del suelo en áreas céntricas, la densificación urbana y los límites de amortiguamiento socioambiental exigidos por las leyes locales (COBOS-MORA *et al.*, 2023).

La resolución científica de esta encrucijada requiere la aplicación de herramientas geoespaciales y de modelado multicriterio avanzadas (MCDA/SIG), capaces de ponderar la accesibilidad vial a través de carreteras de alta capacidad —que permitan optimizar la velocidad comercial de los camiones y evitar el tránsito pesado intraurbano— con el cumplimiento milimétrico de las fajas de exclusión legal impuestas por el ordenamiento territorial y ambiental.

2.2 Localización industrial y análisis multicriterio (MCDA)

2.2.1 Teoría De Localización De Infraestructuras

Definir el emplazamiento de complejos industriales y de saneamiento ambiental dista de ser un mero ejercicio de asignación cartográfica; constituye, en esencia, un desafío de optimización en ingeniería de sistemas territoriales donde convergen la viabilidad económica, el beneficio social y la preservación del entorno (ANGELIS *et al.*, 2021). El corpus teórico que sostiene la macro y micro-localización productiva hunde sus raíces en la economía espacial clásica de finales del siglo XIX y principios del XX. Si bien la Teoría del Lugar Central de Walter Christaller sentó bases importantes, es el Modelo de Localización Industrial formulado por Alfred Weber el que provee el marco analítico más aplicable al manejo de materiales pesados (MALCZEWSKI, 1999).

El axioma weberiano opera sobre un esquema geométrico determinista (el triángulo locacional) cuyo vector principal es la minimización rigurosa de los costos de transporte, calculados en función del peso de los insumos, la fricción de la distancia hacia los centros de demanda y el tonelaje del producto terminado (HUANG *et al.*, 2021).

Al trasladar la lógica de Weber a la ingeniería de gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), el axioma económico cobra un sentido crítico. Dado que el escombros en bruto se caracteriza por poseer un elevado peso específico volumétrico emparejado con un valor comercial nulo antes de su procesamiento, el indicador del flete por tonelada recorrida gobierna la viabilidad financiera del proyecto (MADI; SROUR, 2019). Desde este prisma, la infraestructura de reciclaje demandaría una centralidad absoluta respecto al núcleo urbano denso, por ser este el epicentro de la actividad inmobiliaria, las reformas y, en consecuencia, la generación masiva del residuo (SOUZA *et al.*, 2021).

Sin embargo, los paradigmas contemporáneos de la planificación urbana y las exigencias de las licencias ambientales impiden que este problema se resuelva mediante un análisis unidimensional de costo mínimo de transporte (COBOS-

MORA *et al.*, 2023). Santos *et al.*, (2019) advierten que la estructuración locacional moderna debe incorporar de forma sistémica un entramado de restricciones físicas, ecológicas, sociales y urbanísticas que funcionan como barreras espaciales infranqueables, al margen de la rentabilidad del suelo. Variables geotécnicas como fallas geológicas, laderas inestables o niveles freáticos altos condicionan la viabilidad constructiva.

De forma paralela, la proximidad a zonas residenciales consolidadas desata conflictos por externalidades (ruido de impactos, material particulado en suspensión y colapso de la malla vial menor) que invalidan jurídicamente los predios intraurbanos (CHAKHAR; MOUSSEAU, 2008). El reto de ingeniería, por tanto, se desplaza hacia la búsqueda de un equilibrio multiobjetivo: aproximar la infraestructura a corredores logísticos de alta capacidad de carga (carreteras) para salvaguardar la eficiencia del transporte pesado, blindando al mismo tiempo los perímetros de exclusión ambiental exigidos por la ley (MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

2.2.2 Fundamentos Del Análisis Multicriterio Espacial (MCDA)

Cuando las variables de costo logístico, las restricciones geotécnicas y los perímetros de protección ambiental entran en conflicto directo, la resolución del problema locacional desborda la capacidad de los métodos heurísticos tradicionales o los juicios intuitivos (ROY, 1996). La metodología de la Ayuda a la Decisión Multicriterio (MCDA) ofrece el andamiaje matemático e institucional idóneo para gestionar escenarios de alta complejidad, caracterizados por la ausencia de una solución única perfecta y la presencia de alternativas que satisfacen distintos niveles de exigencia técnica y regulatoria (CHAKHAR; MOUSSEAU, 2008).

La particularidad surge cuando las alternativas evaluadas no son conceptos abstractos, sino porciones geográficas delimitadas por coordenadas, catastros o cuencas hidrográficas; en este punto, el análisis operativo migra hacia el Análisis Multicriterio Espacial (MALCZEWSKI, 1999). De acuerdo con Malczewski y Rinner (2015), este enfoque interdisciplinar combina bases de datos espaciales

con juicios de valor explícitos (preferencias y ponderaciones del equipo técnico), para clasificar el territorio en función de su aptitud para albergar una actividad específica.

A diferencia del MCDA convencional empleado en investigación de operaciones, la vertiente espacial introduce la heterogeneidad e inestabilidad intrínseca del espacio geográfico (ROY, 1996). El territorio deja de modelarse como un plano homogéneo e isotrópico: cada celda o unidad predial posee un vector de atributos único que varía de forma continua a lo largo de las coordenadas geográficas de la región (SOUZA *et al.*, 2021). Un punto específico puede ofrecer una conectividad vial inmejorable hacia una carretera federal, pero estar penalizado por una pendiente excesiva o directamente vetada por normativas de protección de manantiales (CHAKHAR; MOUSSEAU, 2008).

De ahí que el acoplamiento de las técnicas MCDA con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) dote a la ingeniería civil de una plataforma de simulación avanzada. Este entorno unifica escalas métricas dispares (grados de inclinación, metros de *buffer* y categorías cualitativas de uso del suelo), traduciendo variables normativas y físicas en mapas de aptitud definitivos para el emplazamiento de plantas de RCD (COBOS-MORA *et al.*, 2023).

2.2.3 El Proceso De Análisis Jerárquico (AHP) y Su Sustento Matemático

Para mitigar la subjetividad en la asignación de pesos a las variables que intervienen en la localización de infraestructuras de saneamiento, el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), concebido por Thomas Saaty en la década de 1980, se posiciona como uno de los esquemas matriciales más robustos y validados en la ingeniería de proyectos (SAATY, 1980). La premisa teórica del AHP postula que la mente humana procesa con mayor rigurosidad los juicios de valor cuando un problema complejo se descompone en una estructura jerárquica piramidal (DONEVSKA *et al.*, 2012).

La cúspide de esta pirámide la ocupa el objetivo general (en este caso, definir la ubicación óptima para la planta de reciclaje de RCD en Toledo, Paraná). Los niveles intermedios desglosan los criterios y subcriterios técnicos (accesibilidad

vial, recursos hídricos, pendientes, zonificación), mientras que la base operativa alberga las alternativas espaciales que ofrece el territorio (SANTOS *et al.*, 2019).

El núcleo matemático del AHP descansa sobre las matrices de comparación pareada. En lugar de forzar al evaluador a adivinar porcentajes globales de peso para todo el conjunto de variables (un proceso propenso al error cognitivo), el método exige contrastar la importancia relativa de solo dos criterios de manera simultánea e independiente (SAATY, 1980). Estas comparaciones cualitativas se estandarizan mediante la Escala Fundamental de Saaty, la cual vincula juicios lingüísticos con valores numéricos del 1 al 9:

- 1: Igual importancia entre ambos criterios.
- 3: Importancia moderada de una variable sobre otra.
- 5: Importancia fuerte o esencial.
- 7: Importancia muy fuerte o demostrada empíricamente.
- 9: Importancia extrema o absoluta.
- 2, 4, 6, 8: Valores intermedios empleados para ajustar sutilmente las preferencias del modelo.

Matemáticamente, para un sistema con n criterios, se parametriza una matriz cuadrada, recíproca y positiva A de orden " $n \times n$ ".

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde cada componente a_{ij} , cuantifica la dominancia del criterio de la fila i frente al de la columna j , como muestra la **ecuación 2**. La matriz respeta de forma matemática la propiedad de reciprocidad:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2)$$

Y mantiene una diagonal unitaria obligatoria ($a_{ii} = 1$), dado que la comparación de una variable consigo misma es siempre equivalente (SAATY, 1980). El vector de prioridades o "pesos" normalizados (w) se deriva de la resolución del problema del autovector y autovalor principal, expresado en la **ecuación 3** de equilibrio lineal:

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad (3)$$

Donde $\lambda_{\max}$ representa el autovalor máximo real de la matriz A, y w es el autovector no nulo asociado. Al normalizar los componentes de este autovector se obtienen los coeficientes de ponderación relativa (w_i), cuya suma total equivale a la unidad ($\sum w_i = 1$), sirviendo de ponderadores directos para la fase de álgebra de mapas (HUANG *et al.*, 2021).

Un aporte crucial del modelo de Saaty es la verificación de las inconsistencias lógicas en las que puede incurrir el evaluador al efectuar comparaciones cruzadas en matrices de orden $n \geq 3$ (SAATY, 1980). Para validar la estabilidad matemática de estos juicios, el método evalúa la Razón de Consistencia (CR). En una matriz teóricamente perfecta y consistente, el autovalor máximo calculado coincide con el número de criterios ($\lambda_{\max} = n$). No obstante, en la práctica técnica suele ocurrir que $\lambda_{\max} > n$. Esta desviación se mide a través de Consistencia (CI), en la **ecuación 4**.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Finalmente, para determinar si el grado de inconsistencia pone en riesgo la validez científica del modelo, se calcula la Razón de Consistencia (CR) usando la **ecuación 5**, que contrasta el CI obtenido con un Índice de Consistencia Aleatorio (RI) tabulado estadísticamente por Saaty para matrices del mismo orden “n” (DONEVSKA *et al.*, 2012):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

De acuerdo con la teoría matemática del AHP, si el valor de la Razón de Consistencia cumple la condición de ser menor al 10% ($CR < 0.10$), los pesos derivados poseen estabilidad analítica y rigor científico, quedando validados para su integración espacial en el SIG (HUANG *et al.*, 2021). Si el resultado arroja CR

≥ 0.10 , los juicios se consideran lógicamente inconsistentes y la matriz debe reformularse de manera obligatoria (SAATY, 1980). En términos simples, la consistencia lógica es la garantía matemática de que las prioridades asignadas a los diferentes criterios no se contradicen entre sí durante la comparación. En la toma de decisiones, la mente humana tiende a perder la coherencia cuando evalúa múltiples variables a la vez. El coeficiente de consistencia (CR) mide precisamente este margen de error lógico bajo el principio matemático de la transitividad.

2.2.4 Sistemas de información geográfica (SIG) y álgebra de mapas

En las áreas de la ingeniería civil y la planificación ambiental, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han dejado atrás su función clásica de herramientas de dibujo para convertirse en motores avanzados de cálculo numérico y modelado geoespacial (MALCZEWSKI, 1999). Evaluar el territorio para ubicar una planta de RCD demanda el cruce de datos vectoriales discretos (ejes viales, parcelas catastrales) con capas de información continua (topografía del terreno, gradientes de humedad) (ALMEIDA, 2021). El modelo de datos ráster representa el formato estándar por excelencia para ejecutar estas operaciones bajo los principios del álgebra de mapas (MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

Bajo la estructura ráster, el espacio geográfico continuo se divide de forma homogénea en una malla bidimensional de celdas cuadradas (píxeles), donde la longitud del lado del píxel determina la resolución del modelo (ALMEIDA, 2021). Cada celda almacena un único valor numérico, ya sea continuo (pendientes en porcentaje, cotas altimétricas) o categórico (códigos de zonificación urbana), que describe el atributo de esa porción exacta del territorio (MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

A partir de esta matriz, el análisis de las áreas de influencia logística y de amortiguamiento ambiental se realiza mediante algoritmos de distancia euclidiana, conforme **ecuación 6**. Este operador calcula, celda por celda, la longitud en línea recta desde el centro del píxel evaluado hasta el origen del vector objetivo más cercano, aplicando el teorema de Pitágoras sobre coordenadas cartesianas (CHAKHAR; MOUSSEAU, 2008):

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (6)$$

Estas superficies continuas de distancia ráster son esenciales para modelar el costo de la logística inversa y delimitar las fajas de exclusión hídrica.

La síntesis definitiva entre la dimensión espacial (SIG) y las ponderaciones numéricas del método matricial (AHP) se logra mediante la Combinación Lineal Ponderada (WLC), ejecutada en la calculadora ráster (MALCZEWSKI, 1999). El procedimiento WLC sigue las reglas del álgebra de mapas formuladas por Dana Tomlin en 1980: las capas ráster de los criterios de decisión previamente estandarizadas a una escala homogénea y adimensional de aptitud de 0 a 10 se multiplican por los pesos vectoriales (w_i) del autovector AHP y se consolidan mediante una sumatoria lineal continua (SOUZA *et al.*, 2021).

Sin embargo, la alta aptitud logística o física de un terreno se anula por completo si el sitio infringe alguna prohibición legal o urbanística absoluta (MADI; SROUR, 2019). Por ello, el modelo acopla la función WLC con un operador de restricción restrictiva o Filtro Booleano (c_j), configurado bajo una lógica binaria donde el valor cero (0) representa un área prohibida o zona de exclusión, y el valor uno (1) identifica una superficie permitida (MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

Matemáticamente, la función del Índice de Adecuabilidad Global (IAG), **ecuación 7**, para cada celda de la matriz se expresa como el producto de la adición ponderada y el producto de las restricciones binarias (MALCZEWSKI, 1999; COBOS-MORA *et al.*, 2023):

$$I_{AG} = (\sum w_i . x_i) \times \prod c_j \quad (7)$$

Donde:

w_i : peso de importancia relativa del criterio de aptitud i derivado del método AHP.

x_i nota de adecuación estandarizada (escala 0-10) de la celda en el mapa del criterio i .

c_j valor binario (0 o 1) de la restricción condicionante j para esa misma coordenada.

Bajo esta formulación, cualquier píxel del territorio que coincida con una zona de exclusión absoluta ($c_j = 0$) sufre una anulación automática en su Índice de Adecuabilidad Global ($I_{AG} = 0$), sin importar que presentara condiciones perfectas de acceso vial o topografía (SOUZA *et al.*, 2021). Este acoplamiento algorítmico garantiza que los terrenos identificados como óptimos cumplan con los criterios de eficiencia técnica y con los marcos legales y ambientales que ordenan el uso del suelo (MADI; SROUR, 2019).

2.3 Marco normativo y de ordenamiento territorial en Brasil

2.3.1 Política nacional de residuos sólidos (PNRS) y el sector de RCD

La gobernanza ambiental, la responsabilidad jurídica y la gestión operativa de los flujos de materiales post-consumo en el territorio brasileño experimentaron un cambio de paradigma estructural a partir de la promulgación de la Ley Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, la cual instituyó la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS). Esta legislación marco superó las antiguas directrices fragmentadas y de carácter puramente punitivo al unificar, bajo un único texto vinculante, los principios de responsabilidad compartida, ecoeficiencia industrial, desarrollo sostenible regional y el ordenamiento jerárquico de las prioridades en la gestión de los residuos urbanos e industriales (BRASIL, 2010).

Para el sector de la ingeniería civil, la PNRS actúa como un mecanismo coercitivo y de fomento que obliga a desvincular el crecimiento de la infraestructura urbana de la degradación ambiental provocada por el descarte masivo de escombros (ANGELIS *et al.*, 2021).

El artículo nono de la citada Ley Federal establece una pirámide de prioridades operacionales de cumplimiento obligatorio para los generadores, transportistas y municipalidades, cuyo orden secuencial estricto condiciona cualquier proyecto de saneamiento: no generación, reducción, reutilización, reciclaje, tratamiento de

residuos sólidos y disposición final ambientalmente adecuada de los rechazos (BRASIL, 2010). Bajo este mandato normativo, la trituración, cribado y reconversión de los RCD de Clase A en agregados reciclados deja de ser una opción discrecional o puramente reputacional de las empresas constructoras para convertirse en una estrategia prioritaria de alineación legal.

La ley penaliza de forma directa la vieja práctica del confinamiento masivo de escombros en vertederos municipales sin antes haber agotado las posibilidades técnicas y económicas de valorización industrial secundaria (SOUZA *et al.*, 2021). De acuerdo con la PNRS, únicamente aquellos residuos que no dispongan de ninguna alternativa de reciclaje o tratamiento tecnológico viable bajo el estado del arte actual pueden ser catalogados como "rechazos" y, por ende, admitidos en celdas de disposición final (BRASIL, 2010).

Un instrumento neurálgico introducido por la PNRS con afectación directa al modelado de localización es la obligatoriedad de la responsabilidad compartida por el ciclo de vida de los productos y la consecuente exigencia de los Planes de Gestión de Residuos de la Construcción Civil (PGRCC) por parte de los grandes generadores (empresas de demolición, constructoras, contratistas y corporaciones inmobiliarias). La legislación determina de forma explícita que los agentes privados son civil, administrativa y financieramente responsables del manejo integral de sus escombros desde el frente de obra hasta su destino final autorizado (BRASIL, 2010).

Por consiguiente, la estructuración de una planta de reciclaje debidamente formalizada y licenciada dentro del municipio de Toledo, Paraná, provee a estos agentes económicos la infraestructura legal indispensable para canalizar sus residuos de Clase A de forma regular. Esto alivia la saturación de los servicios públicos de recolección, mitiga el riesgo de severas sanciones administrativas o multas por crimen ambiental asociadas al descarte clandestino y, simultáneamente, alimenta el mercado local con subproductos triturados de costo competitivo (MADI; SROUR, 2019).

2.3.2 Restricciones ambientales, urbanísticas e ingenieriles

La implantación y viabilidad de una infraestructura de valorización e industrialización de RCD requiere el cumplimiento estricto de un entramado normativo multifactorial. Desde la perspectiva del modelado geoespacial, el territorio no solo se ve restringido por los recursos hídricos, sino también por el marco legal que regula el derecho de vía de las infraestructuras de transporte, los límites técnicos de la topografía para la ingeniería civil, las políticas de protección de suelos y, de manera vinculante, la zonificación municipal (MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Cada uno de estos factores se traduce en el modelo como un criterio de aptitud (escala continua) o como una restricción booleana absoluta (exclusión binaria).

2.3.2.1 . Recursos Hídricos y Cobertura Vegetal (Código Forestal)

Como se fundamentó previamente, la Ley Federal nº 12.651/2012 rige la delimitación de las Áreas de Preservación Permanente (APP) (BRASIL, 2012). En el entorno de estudio del municipio de Toledo, surcado por microcuencas y arroyos de dimensiones menores, la ley impone fajas marginales de 30 metros para cursos de agua de menos de 10 metros de ancho, y de 50 metros de radio para nacientes (BRASIL, 2012). Estas zonas operan como filtros de exclusión absoluta (valor cero), ya que cualquier intervención industrial en ellas constituye un crimen ambiental insubsanable (SOUZA *et al.*, 2021).

2.3.2.2 Infraestructura Vial y Transporte (Fajas de Dominio)

El análisis logístico vial no solo busca la máxima proximidad a las carreteras para reducir los costos de transporte, sino que debe respetar la legislación vial federal y del estado de Paraná. Las carreteras que conectan y atraviesan el municipio de Toledo están sujetas a las directrices del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (DNIT) y del Departamento de Estradas de Rodaje (DER-PR).

De acuerdo con la Ley Federal nº 6.766/1979 (Ley de Parcelamiento del Suelo Urbano), modificada por la Ley nº 13.913/2019, se establece una faja de dominio público a lo largo de las carreteras, acompañada de una faja *non aedificandi* (franja de reserva donde está terminantemente prohibido edificar) que típicamente suma un mínimo de 15 metros a cada lado de la vía (pudiendo reducirse por ley municipal hasta 5 metros en zonas urbanas) (BRASIL, 1979; BRASIL, 2019). En el modelado SIG, estas fajas de dominio se introducen como *buffers* de exclusión booleana absoluta (valor cero), mientras que las áreas inmediatamente exteriores a este límite se parametrizan como zonas de máxima aptitud de accesibilidad para optimizar el giro y flujo de camiones pesados sin saturar la red vial menor (ANGELIS *et al.*, 2021).

2.3.2.3 Relieve y Topografía (Límites Ingenieriles y Geotécnicos)

El relieve no es solo una variable de costo de movimiento de tierras; está estrictamente regulado debido a los riesgos geofísicos de erosión, deslizamientos de ladera y escorrentía superficial de lixiviados. La Ley nº 6.766/1979 prohíbe el parcelamiento del suelo y la edificación en terrenos con pendientes superiores al 30% (aproximadamente 17°), a menos que se cumplan exigencias técnicas específicas de las autoridades locales (BRASIL, 1979).

Asimismo, el Código Forestal clasifica como APP a aquellas pendientes superiores a 45° (100%) (BRASIL, 2012). Para la ingeniería de una planta de reciclaje de RCD (que requiere plataformas estables para maquinaria pesada de trituración, básculas de pesaje y patios de almacenamiento de grandes volúmenes de agregados), el relieve actúa como un filtro restrictivo: las pendientes llanas o moderadas (0% a 5%) reciben la máxima calificación de aptitud, mientras que los terrenos que superan los umbrales legales y de seguridad geotécnica (>15% a 30%) se excluyen por completo para evitar riesgos de inestabilidad estructural y pasivos ambientales (MALCZEWSKI, 1999).

2.3.2.4 Uso, Ocupación y Zonificación del Suelo (Plan Regulador de Toledo)

La síntesis y aplicación final de todas estas restricciones confluye en la Ley Obligatoria del Plan Regulador del Municipio de Toledo. En estricta alineación con el Estatuto de la Ciudad (Ley Federal nº 10.257/2001), el Plan Director de Toledo organiza el territorio municipal separando los usos incompatibles para salvaguardar la calidad de vida urbana y la función social de la propiedad (BRASIL, 2001).

Una unidad de tratamiento de RCD genera externalidades moderadas inevitables: ruido por impacto mecánico de fragmentación de hormigón, vibraciones de baja frecuencia, polvo en suspensión y tráfico continuo de vehículos de carga pesada. Por ello, la zonificación urbana de Toledo actúa como el filtro legal más restrictivo del modelo:

- Zonas de Exclusión Absoluta (Valor 0): Las Zonas Residenciales (ZR), Zonas Comerciales (ZC), Áreas de Protección Ambiental Municipal, perímetros escolares y de salud, y las zonas de amortiguamiento de equipamientos urbanos sensibles quedan vetadas de forma automática en el SIG (MADI; SROUR, 2019).
- Zonas de Aptitud Restringida o Condicionada: Las áreas de producción agrícola del cinturón periurbano exigen un análisis de compatibilidad para no interferir con actividades agropecuarias intensivas o ecosistemas rurales frágiles (COBOS-MORA *et al.*, 2023).
- Zonas de Aptitud Óptima (Valor 1 en Filtro Booleano): El Plan Director de Toledo orienta las actividades industriales hacia las Zonas Industriales (ZI), Zonas de Servicios (ZS) o polígonos industriales específicos establecidos en las periferias o ejes de expansión de la ciudad. Estas zonas no solo garantizan legalmente la compatibilidad del uso del suelo, sino que cuentan con las fajas de aislamiento socio ambiental requeridas para neutralizar los conflictos de vecindad y asegurar la viabilidad jurídica durante la posterior fase de Licenciamiento Ambiental ante el Instituto Agua y Terra (IAT) del estado de Paraná (SOUZA *et al.*, 2021).

2.3.3 Dinámica urbana, crecimiento demográfico y expansión del municipio de Toledo

La justificativa espacial, el dimensionamiento operativo y la estimación de la vida útil de una infraestructura de valorización de residuos de la construcción civil están directamente condicionados por la escala cuantitativa del crecimiento demográfico y la magnitud del capital físico acumulado en el territorio. En el estado de Paraná, el municipio de Toledo se consolidó en las últimas décadas como un polo económico regional estratégico de la mesorregión del Oeste Paranaense. Este desarrollo, inicialmente impulsado por el dinamismo agroindustrial de su cadena productiva, derivó en un proceso de urbanización acelerado que reconfiguró de manera profunda su morfología urbana e incrementó la demanda de infraestructura habitacional, vial y comercial (IPARDES, 2024).

Desde el punto de vista demográfico, el municipio ha experimentado un crecimiento poblacional sostenido con tasas que superan significativamente la media del estado y del país. De acuerdo con los datos oficiales del Instituto Brasileiro de Geografia y Estadística (IBGE), Toledo contaba en el Censo de 2010 con una población de 119.313 habitantes. Para el Censo de 2022, la población empadronada ascendió a 150.470 habitantes, lo que representa un incremento demográfico intercensal absoluto de 31.157 nuevos residentes (un crecimiento del 26,11% en dicho periodo) (IBGE, 2022). Esta tendencia expansiva se mantiene firme, con estimaciones oficiales que sitúan la población municipal por encima de los 156.000 habitantes para el año 2026 (IBGE, 2026).

Este contingente poblacional se distribuye sobre una extensión territorial total de 1.198,345 km², lo que configura una densidad demográfica media de aproximadamente 125,57 hab/km² (IBGE, 2022). No obstante, este indicador presenta una fuerte asimetría espacial, dado que cerca del 90% de la población reside en el área urbana consolidada, concentrando el consumo de materiales y la generación de escombros en un perímetro compacto que se expande radialmente hacia los bordes de la ciudad.

La expansión física de Toledo sigue los vectores de los ejes viales estructurales y las directrices impuestas por la legislación urbana local. Históricamente, la ocupación del suelo transitó de un modelo estrictamente denso hacia un esquema de dispersión periurbana controlada a lo largo de las carreteras conectoras PR-317 y BR-163. El dinamismo inmobiliario derivado de este crecimiento se refleja de forma directa en los indicadores económicos sectoriales: el municipio registra un promedio anual de licencias de obra que supera los 200.000 m² de área a edificar, impulsado tanto por la apertura de nuevos fraccionamientos (loteamientos) en los márgenes exteriores como por un notable proceso de verticalización en su Zona Central y barrios consolidados como La Salle, Jardín Coopagro y Vila Industrial (IPARDES, 2024).

Para un modelo de localización basado en SIG-MCDA, la integración de estas métricas cuantitativas permite calibrar los criterios de aptitud y fricción de la distancia con mayor precisión:

- Saturación del núcleo consolidado: La densidad de edificación en el centro urbano genera picos localizados de RCD pesados de alta pureza mineral (hormigón, bloques cerámicos y morteros), idóneos para la trituración mecánica, pero con severas restricciones de espacio y zonificación para su procesamiento in situ.
- Vectores de expansión periurbana: El crecimiento horizontal hacia las periferias agrícolas genera grandes volúmenes de tierra de excavación y escombros mixtos dispersos.

Por consiguiente, la planta de reciclaje debe posicionarse estratégicamente fuera del radio de alta densidad demográfica para evitar conflictos de vecindad por ruido y material particulado, pero lo suficientemente próxima a los ejes viales estructurantes para absorber de manera eficiente los flujos logísticos de los frentes de expansión urbana activos en el cinturón periurbano de Toledo (MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

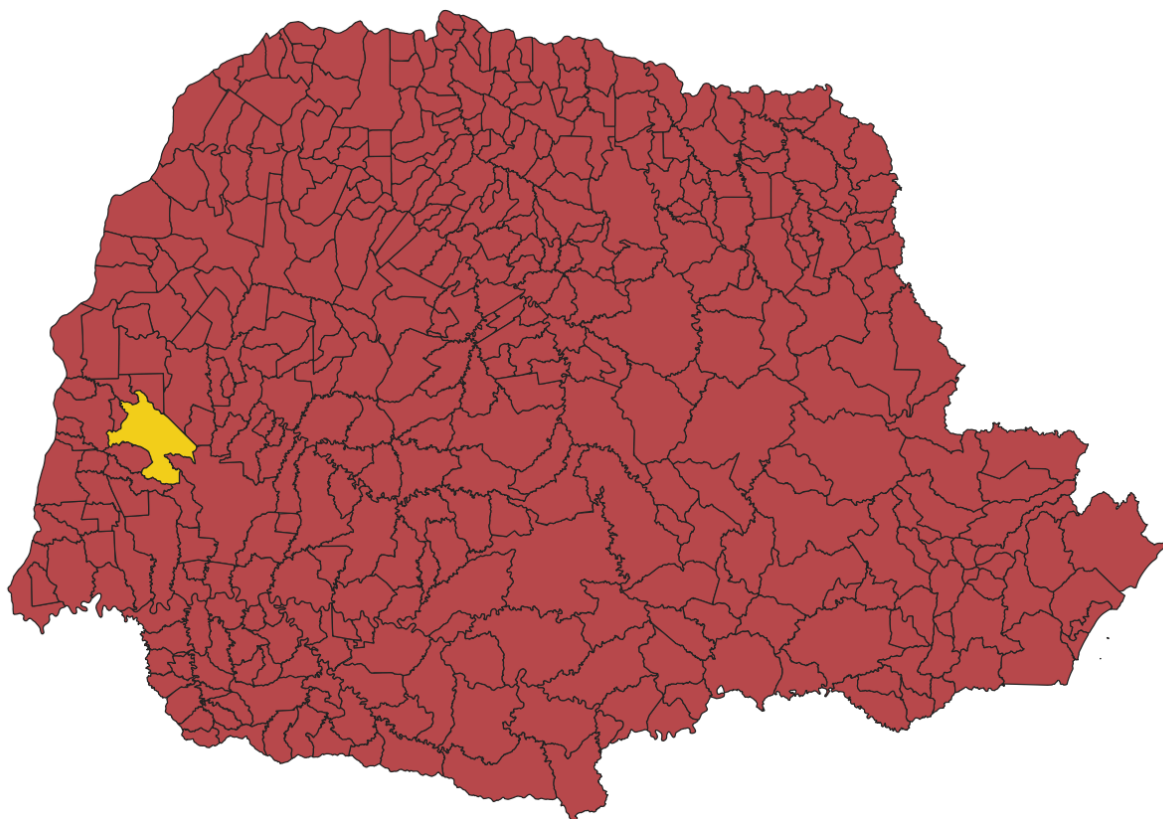
3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Planteamiento y enfoque del trabajo

El presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo y aplicado, cuyo objetivo central fue el desarrollo de un modelo matemático y geográfico para la evaluación territorial del municipio de Toledo, Paraná. El modelo se estructuró con el propósito de identificar las áreas con mayor aptitud para la implantación de una planta de reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Con el fin de garantizar un procedimiento sistemático y replicable, el proceso metodológico se dividió en cuatro etapas consecutivas.

Para contextualizar espacialmente el desarrollo del modelo y comprender la distribución de las variables territoriales analizadas, la delimitación geográfica y la configuración general del área de estudio se presentan en la Figura abajo. Este mapa base del municipio de Toledo, Paraná, constituye el marco de referencia espacial sobre el cual se ejecutaron las fases consecutivas de recolección de datos y el posterior análisis multicriterio en el Sistema de Información Geográfica (SIG).

Figura 1 - Mapa de localización general y delimitación del área de estudio en el municipio de Toledo - PR.



Fuente: a autora 2026.

El presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo y aplicado, cuyo objetivo central fue el desarrollo de un modelo matemático y geográfico para la evaluación territorial del municipio de Toledo, Paraná. El modelo se estructuró con el propósito de identificar las áreas con mayor aptitud para la implantación de una planta de reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Con el fin de garantizar un procedimiento sistemático y replicable, el proceso metodológico se dividió en cuatro etapas consecutivas:

3.1.1 Fase De Recolección De Datos

Reunir los mapas vectoriales y de cuadrícula (ráster) de las instituciones y páginas oficiales. Este proceso implicó la descarga y estructuración de bases de datos geospaciales provenientes de plataformas gubernamentales y científicas como el IBGE y MapBiomás. Específicamente, se recopilaron las capas vectoriales correspondientes a la red de rodovías y la hidrografía del municipio de Toledo, así como los datos ráster necesarios para el análisis de las variables físicas, incluyendo el Modelo Digital de Elevación (MDE) para determinar el desnivel del terreno y la matriz de uso y ocupación del suelo. Toda la información fue estandarizada bajo el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS 2000, Zona 22S) para garantizar la consistencia geométrica del modelo.

3.1.2 Fase de atribución de pesos (AHP)

Configurar el modelo propuesto mediante comparaciones de los criterios elegidos para calcular que porcentaje de importancia tiene cada uno. Para ello, se implementó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) de Saaty, estructurando una matriz de comparación pareada que evalúa la relevancia relativa de cada variable (rodovías, hidrografía, desnivel del terreno y uso del suelo). Mediante la normalización de vectores propios, se calcularon los pesos ponderados que definen el porcentaje de influencia de cada criterio en la toma de decisiones. Asimismo, la validez matemática de estos pesos se verificó mediante el cálculo de la Razón de Consistencia (CR), asegurando que el índice se mantuviera por debajo del límite admisible del 10% para descartar cualquier inconsistencia lógica en los juicios técnicos.

3.1.3 Fase de filtro legal (Filtro booleano)

Antes de la integración final, se procedió a la delimitación de las zonas de exclusión mediante álgebra de mapas y lógica booleana (0 y 1). Esta etapa consistió en aplicar restricciones normativas e institucionales rígidas, tales como las Áreas de Preservación Permanente (APP) asociadas a la hidrografía bajo el Código Forestal y los perímetros restringidos por el Plan Director de Toledo. Juntar todas las capas en el programa QGIS para armar el mapa de aptitud final y determinar los sectores óptimos. A través de la superposición ponderada de los criterios continuos combinados con los filtros booleanos de exclusión, el SIG discriminó las áreas inviables de aquellas con aptitud alta, permitiendo la identificación geoespacial de los polígonos idóneos para el emplazamiento de la usina de reciclaje de RCD.

3.1.4 Fase de cruce de datos

Todo el procesamiento geoespacial, el cálculo de distancias euclidianas y el modelado de pendientes se ejecutaron bajo el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS 2000) y el sistema de proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), huso 22 Sur. La adopción de este huso responde a la ubicación geográfica del municipio de Toledo, situado aproximadamente a 53°44' de longitud Oeste y 24°42' de latitud Sur. Dado que el huso 22 abarca las longitudes de 54° a 48° Oeste, su aplicación minimiza las distancias y distorsiones angulares, garantizando la precisión métrica del modelo.

3.2 Materiales y bases de datos utilizadas

Para asegurar la confiabilidad del modelo, la recopilación cartográfica se realizó a través de los repositorios de agencias públicas brasileñas, empleando tanto estructuras vectoriales como matriciales. Los detalles sobre la procedencia, formato, año y aplicación de cada plano de información se consolidaron en la **Tabla 1**.

Tabla 1 – Datos geoespaciales utilizados

MAPA TEMÁTICO	FUENTE DE DATOS	RESOLUCIÓN ORIGINAL	FORMATO DE EXTRACCIÓN	FUNCIÓN EN EL PROYECTO
Grilla UTM Mundial	World UTM Shapefile	Global Vectorial	Ráster (GeoTIFF)	Establecimiento de la zona UTM 22S como base de referencia espacial del proyecto.
Limite Municipal	IBGE (Malla Municipal)	1:250.000 1:50.000	Vectorial (Shapefile)	Delimitación del área de estudio en Toledo, PR y recorte de capas secundarias.
Mapa de ríos	ANA (Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento, 2019)	1:50.000 / 1:100.000	Vectorial (Shapefile)	Identificación de cuerpos de agua superficiales y aplicación de áreas de amortiguamiento (<i>buffers</i>) de 50m.
Mapa de carreteras	DNIT	1:25.000	Vectorial (Shapefile)	Análisis de proximidad vial y optimización logística para el transporte pesado de RCD.

MAPA TEMÁTICO	FUENTE DE DATOS	RESOLUCIÓN ORIGINAL	FORMATO DE EXTRACCIÓN	FUNCIÓN EN EL PROYECTO
Mapa de Uso y Ocupación de Suelo	MapBiomass Brasil (Colección 9.0 / 2024)	30 metros	Ráster (<i>GeoTIFF</i>)	Clasificación de las coberturas vegetales, zonas verdes y áreas urbanizadas actuales.
Mapa de Relieve (MDE)	ALOS PALSAR	12,5 metros	Ráster (<i>GeoTIFF</i>)	Generación del mapa de pendientes para evaluar la aptitud constructiva del suelo.
Zonificación urbana	GeoToledo (Municipalidad de Toledo)	Local / Vectorial	Vectorial (<i>Shapefile</i>)	Validación legal de las restricciones y usos permitidos según el Plan Director.

Fuente: autora 2026.

3.3 Método de análisis multicriterio (AHP) y selección de parámetros

Para la evaluación y jerarquización de las alternativas territoriales, se aplicó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), un método matemático de toma de decisiones desarrollado por Thomas Saaty (1980). Esta herramienta permite resolver problemas de localización complejos mediante la reducción de variables en una matriz de comparación en parejas. Los parámetros geográficos definitivos integrados en este modelo (carreteras, pendientes, recursos hídricos y uso del suelo) se seleccionaron siguiendo los estándares técnicos de la ingeniería civil y los marcos regulatorios brasileños, garantizando que el diseño represente las restricciones físicas, legales y operativas reales del municipio de Toledo.

La inclusión de estas variables se fundamenta en necesidades estratégicas de infraestructura, ingeniería vial, preservación ambiental y planificación urbana:

- **Pendientes y Carreteras:** La evaluación de pendientes responde directamente a la viabilidad constructiva de las obras civiles, el movimiento de tierras (corte y relleno) y la estabilidad mecánica necesaria para la operación segura de maquinaria pesada y celdas de almacenamiento. Por su parte, el parámetro de carreteras obedece a la optimización logística; dado que el acarreo de escombros e inertes representa el costo operativo más elevado y crítico dentro de la gestión de RCD debido a su baja densidad económica por unidad de masa, el modelo otorga una alta relevancia a la accesibilidad vial para mitigar el consumo de combustible, los tiempos de ciclo y el desgaste prematuro de la malla vial local.
- **Recursos Hídricos:** El análisis de la proximidad a la red hidrográfica se establece como un factor crítico de vulnerabilidad ambiental. Su integración tiene el doble propósito de garantizar el cumplimiento estricto de las Áreas de Preservación Permanente (APP) exigidas por el Código Forestal Brasileño (Ley nº 12.651/2012) y de mitigar riesgos de contaminación difusa por escorrentía superficial o lixiviación de materiales particulados hacia los cuerpos de agua, protegiendo así los recursos hídricos del municipio frente a posibles impactos ambientales derivados de la actividad de acopio y trituración.
- **Uso del Suelo:** La incorporación del uso y ocupación del suelo responde a la necesidad de armonizar la planta de reciclaje con el ordenamiento territorial vigente y las dinámicas socio espaciales de Toledo. Este criterio busca maximizar la compatibilidad con zonas de vocación industrial o rural antropizada, evitando conflictos de vecindad derivados de las externalidades propias de estas instalaciones siendo como la generación de ruido, vibraciones y material particulado (polvo), protegiendo los núcleos de alta densidad residencial y las áreas de interés ecológico o

turístico.

Matemáticamente, el proceso se estructuró a partir de una matriz cuadrada de juicios A , de dimensiones “ $n \times n$ ” (donde $n = 4$ criterios), expresada algebraicamente en la **ecuación 1**.

Cada elemento a_{ij} representa la tasa de importancia relativa del criterio de la fila i sobre el criterio de la columna j . Esta matriz cumple de manera estricta con las propiedades algebraicas fundamentales de diagonal unitaria ($a_{ii} = 1$) y reciprocidad matemática, descrita en la **ecuación 2**.

A cada intersección de criterios se le asignó un valor numérico basado en la Escala Fundamental de Saaty, donde el valor 1 indica igual importancia entre elementos y el 9 representa la supremacía extrema de un criterio sobre otro. Para fundamentar la coherencia de las asignaciones y asegurar que las prioridades no fuesen arbitrarias, se tomó como referencia metodológica los principios del Proceso de Análisis Jerárquico (SAATY, 1990, 2008) y los criterios de aptitud territorial para plantas de reciclaje de RCD discutidos en la literatura especializada brasileña (MARCHESI *et al.*, 2018; SANTOS; FERREIRA, 2021).

Al rellenar una matriz con valoraciones técnicas individuales, existe el riesgo latente de cometer contradicciones lógicas humanas. Por lo tanto, para garantizar que las calificaciones mantuvieron una coherencia matemática estricta, se utilizó la herramienta de control de calidad del método AHP denominada Razón de Consistencia (CR). Este indicador mide el nivel de lógica interna de la matriz determinando en primer lugar el Índice de Consistencia (CI) en función del autovalor máximo obtenido ($\lambda_{\max}$) y el número de criterios analizados (n), mediante la **ecuación 4**.

Posteriormente, el valor del CR se calcula dividiendo el Índice de Consistencia (CI) entre un Índice Aleatorio (RI) de valor fijo para tablas de cuatro variables (RI=0.90), mediante la siguiente **ecuación 5**.

De acuerdo con las reglas del método AHP, si el valor del CR es menor a 0.10 (10%), significa que la matriz es coherente y los pesos calculados son válidos para el álgebra de mapas. Los valores numéricos resultantes de las

comparaciones pareadas, el desarrollo del escenario propuesto, el cálculo de consistencia y la validación de las prioridades de este estudio se exponen y analizan detalladamente en el capítulo de resultados.

3.4 Unificación de escalas y criterios de calificación

Antes de realizar el cruce final de las capas en el SIG, se requiere un proceso de normalización de las variables, consistente en la transformación de los datos reales de cada mapa a una escala única de calificaciones de rangos cerrados. En esta escala estandarizada, el valor mínimo representa un terreno completamente inadecuado o restrictivo (ya sea por limitaciones mecánicas o prohibiciones legales), mientras que el valor máximo representa las condiciones ideales para la instalación de la infraestructura de reciclaje de RCD. La definición específica de estos rangos y la asignación de sus notas se fundamentan tanto en los criterios técnicos de la ingeniería civil como en el marco normativo ambiental y urbanístico brasileño.

Una vez unificadas conceptualmente las variables, se ejecuta la fórmula final del álgebra de mapas dentro de la calculadora ráster de QGIS. Esta ecuación multiplica la nota asignada a cada píxel de 12.5 metros por el peso porcentual calculado previamente mediante el método AHP, incorporando de forma simultánea el filtro booleano mediante el producto de su capa binaria, expresándose de la siguiente manera:

$$Aptitud = (\sum_{i=1}^n w_i \times c_i) \times F_{Booleano} \quad (8)$$

Donde w_i representa el peso de importancia relativa derivado del análisis jerárquico para el criterio i , c_i corresponde a la calificación normalizada del píxel evaluado, y $F_{Booleano}$ constituye el valor restrictivo binario de exclusión legal.

A diferencia de la gradualidad matemática del método AHP, el filtro booleano opera bajo una lógica binaria excluyente (0 o 1) que actúa como una máscara digital sobre el territorio en función de las directrices de la Ley Complementar nº 18/2018 (Plano Director Participativo del Municipio de Toledo). Mediante este procedimiento, las áreas legalmente incompatibles se anulan automáticamente al recibir un valor de cero (0), asegurando que los sectores con puntuaciones elevadas en el modelo final sean tanto logística como normativamente viables.

3.5 Flujo de procesamiento de datos y arquitectura del modelo

Para asegurar la sistematización y reproducibilidad del análisis espacial multifactorial implementado en el municipio de Toledo, la integración de datos se estructuró bajo una arquitectura de procesamiento secuencial. Este flujo metodológico organiza de manera lógica la transición de la información, desde su estado vectorial e institucional crudo hasta la obtención del plano cartográfico definitivo de toma de decisiones.

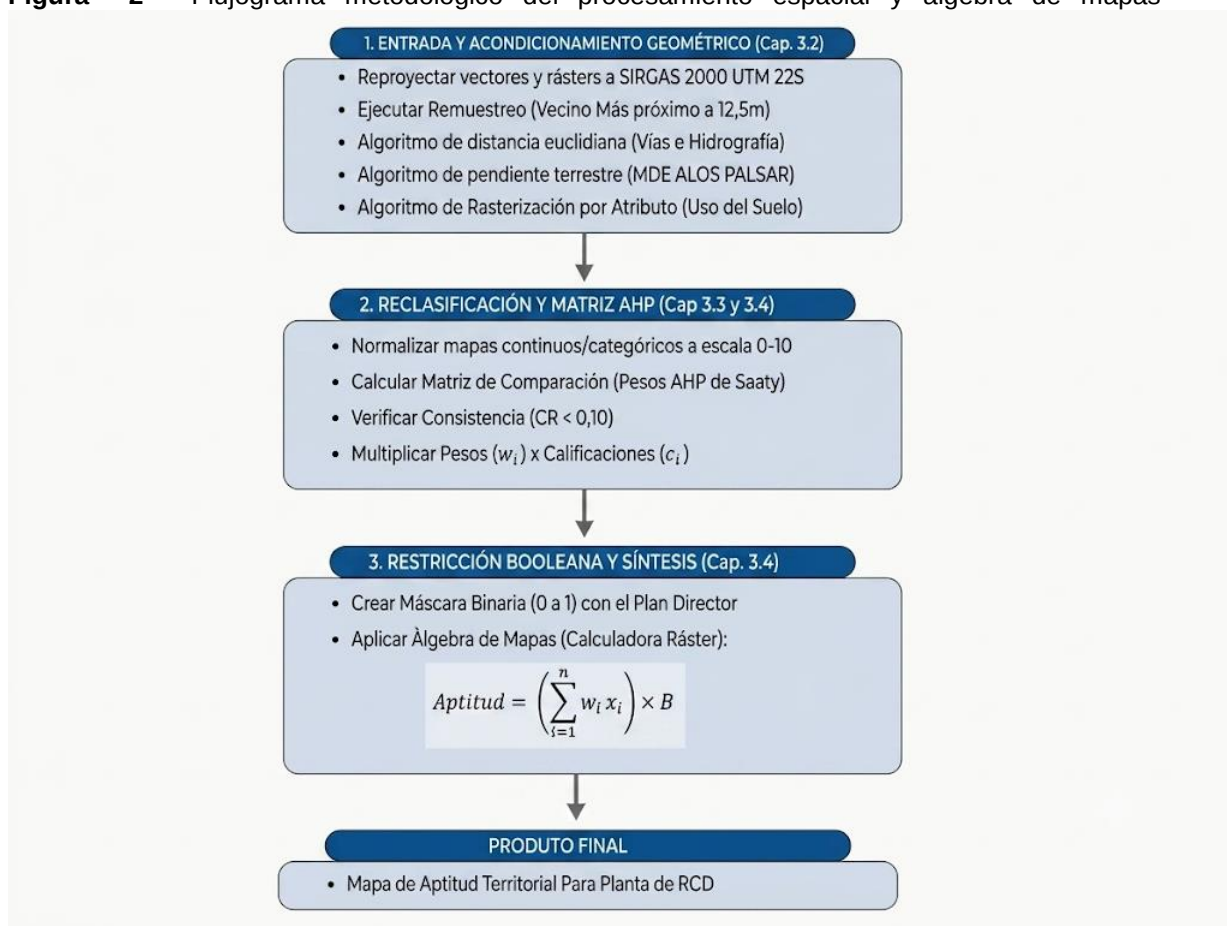
El modelo operativo se divide en tres niveles interconectados de procesamiento:

- Nivel de Entrada y Acondicionamiento Geométrico: Involucra la estandarización del sistema de coordenadas de los archivos al sistema de referencia SIRGAS 2000 UTM 22S y la ejecución del análisis de remuestreo a 12.5 metros. En esta etapa, los algoritmos de distancia euclidiana, análisis de relieve y rasterización por atributo extraen las variables numéricas a partir de los datos base de carreteras, hidrografía, elevación y uso del suelo.
- Nivel de Integración de Criterios (Matriz AHP): Consiste en la incorporación de los pesos porcentuales calculados mediante el análisis jerárquico. Las capas continuas y categóricas previamente acondicionadas son sometidas a la reclasificación matricial en rangos de calificación, preparándose para la combinación lineal ponderada dentro del entorno SIG.
- Nivel de Restricción Booleana y Síntesis Final: Representa el cruce

definitivo del modelo. En esta fase, la máscara digital restrictiva derivada de la Ley Complementar nº 18/2018 interseca algebraicamente la matriz de aptitud. Esta operación actúa como un filtro terminal de exclusión territorial, descartando de forma automática las zonas prohibidas y aislando las celdas con viabilidad real de ingeniería.

La secuencia lógica y operativa de los procesos algorítmicos descritos, que guían el modelo geoespacial para la localización de la planta de reciclaje de RCD en el territorio de estudio, se detalla visualmente en el flujograma de la ilustración.

Figura 2 - Flujograma metodológico del procesamiento espacial y álgebra de mapas



Fuente: a autora 2026.

4 DISCUSIONES Y RESULTADOS

El análisis e integración espacial de los factores físicos, ambientales y urbanísticos mediante el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) permitieron cartografiar y cuantificar el potencial del territorio de Toledo, Paraná, para el emplazamiento de una planta de valorización de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). A continuación, se desglosan los resultados obtenidos en cada etapa del modelado, la validación estadística de las prioridades técnicas y la espacialización de los mapas de aptitud sectoriales y globales.

4.1 Validación matemática del modelo multicriterio (AHP)

Como paso previo al álgebra de mapas, se evaluó la consistencia interna de la matriz de juicios desarrollada para el escenario de optimización logística. La **Tabla 2** expone las comparaciones apareadas según la escala fundamental de Saaty y los pesos analíticos derivados para cada variable.

Tabla 2 – Matriz de comparación pareada y pesos analíticos del modelo.

CRITERIO	CERCANIA VIAL	DISTANCIA A RÍOS	PENDIENTE DEL SUELO	USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO	PESO FIANAL (w _i)	PORCENTUAL (%)
Cercanía Vial	1,00	3,00	4,00	4,00	0,50	50%
Distancia a Ríos	0,33	1,00	2,00	2,00	0,20	20%
Pendiente del suelo	0,25	0,50	1,00	1,00	0,15	15%
Uso del suelo	0,25	0,50	1,00	1,00	0,15	15%
Suma	1,83	5,00	8,00	8,00	1,00	100%

Fuente: a autora 2026.

La resolución de la matriz determinó un autovalor máximo $\lambda_{\max} = 4,054$. A partir de este parámetro, el Índice de Consistencia calculado fue de $CI = 0,018$. Al contrastarlo con el Índice Aleatorio correspondiente a matrices de orden cuatro ($RI = 0,90$), se obtuvo una Razón de Consistencia (CR) de 0,02 (2%). Dado que este resultado es notablemente inferior al límite crítico del 10% ($CR < 0,10$), se valida estadísticamente la consistencia lógica de las ponderaciones. El peso dominante del 50% asignado a la cercanía vial fundamenta el enfoque de ingeniería económica del proyecto, priorizando la reducción de los costos operativos asociados al transporte pesado de escombros hacia la planta.

4.2 Análisis geográfico de los criterios normalizados

De acuerdo con la metodología de estandarización descrita, cada plano de información cartográfica fue transformado a una grilla ráster homogénea con celdas de 12,5 metros y una escala adimensional de calificación del 0 al 10 (donde 0 representa una condición inapta y 10 una condición ideal). A continuación, se analiza de manera individualizada la espacialización y el comportamiento numérico de cada criterio.

4.2.1 Criterio de Accesibilidad Vial (Carreteras)

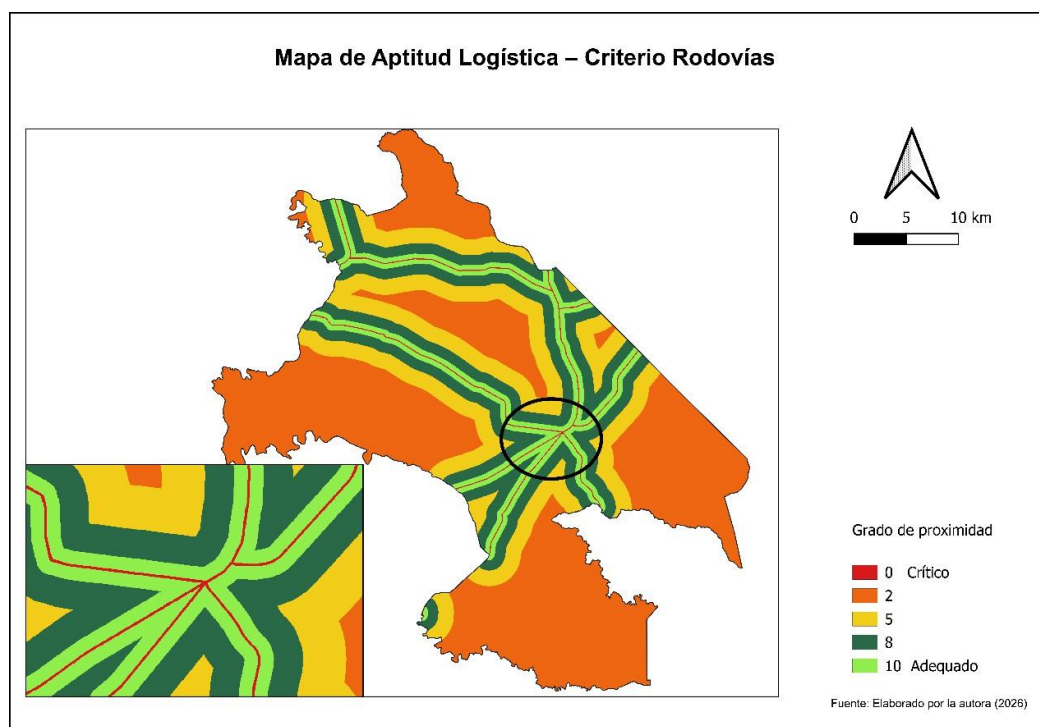
El análisis espacial de distancias euclidianas a los ejes de transporte terrestres (carreteras federales y estatales como la BR-163 y PR-317, procesadas con datos del DNIT) demostró que las zonas con aptitud ideal se concentran en franjas *buffer* paralelas a las rutas. Se estableció una franja de exclusión de seguridad inmediata (0 - 40m) para respetar el derecho de vía y fajas de dominio normativas. Las zonas de aptitud baja se localizan a distancias superiores a los 3000 metros hacia el interior de los distritos rurales, donde la baja densidad de infraestructura vial aumentaría drásticamente los costos de acarreo por tonelada-kilómetro $t * km$. Los intervalos de distancia, calificaciones asignadas y el peso ponderado final para este criterio se detallan en la **Tabla 3**.

Tabla 3 – Valores de aptitud para el criterio de Accesibilidad Vial (Carreteras).

APTITUD TERRITORIAL	INTERVALO/ RANGO REAL	CALIFICACIÓN (NOTA)	VALOR PONDERADO (PESO: 50%)
Inapto	0 - 40	0	0,00
Ideal	40 - 500	10	5,00
Alta	500 – 1500m	8	4,00
Media	1500 – 3000m	5	2,50
Baja	> 3000m	2	1,00

Fuente: a autora 2026.

A partir de los rangos e intervalos establecidos en la **Tabla 3**, se procedió a la espacialización cartográfica del área de estudio mediante el uso de herramientas SIG. En la **Figura 3** se expone el mapa resultante para la variable de accesibilidad vial, donde se identifican geográficamente los sectores con mayores ventajas logísticas para el transporte pesado dentro del municipio.

Figura 3 - Mapa de Aptitud logística para el criterio de Carreteras

Fuente: a autora 2026.

4.2.2 Criterio de Recursos Hídricos (Ríos)

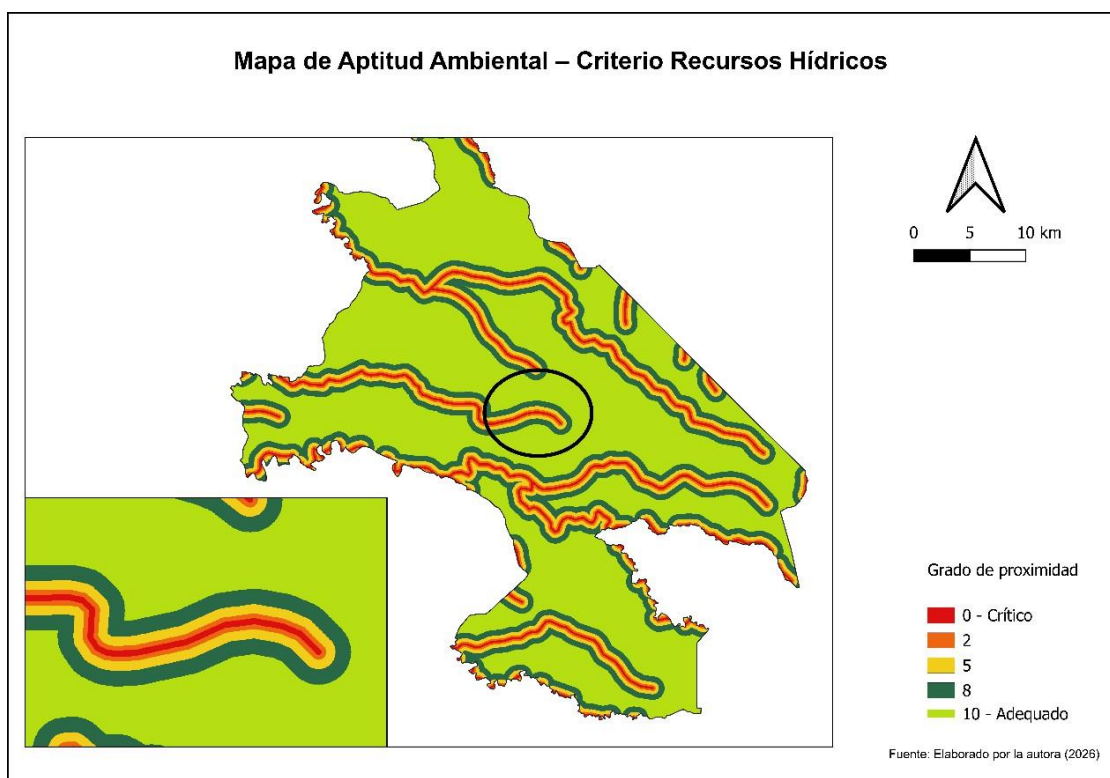
El procesamiento de la red hidrográfica superficial del municipio de Toledo, provista por la ANA, generó un patrón concéntrico inverso de aptitud. Las celdas inmediatamente colindantes a los ríos y nacientes (0 – 50m) recibieron una calificación restrictiva de 0, salvaguardando las Áreas de Preservación Permanente (APP) impuestas por el Código Forestal Brasileño. Conforme el análisis se aleja de los cuerpos de agua, la calificación aumenta gradualmente, reduciendo la vulnerabilidad ambiental ante eventuales eventos de lixiviación o escorrentía superficial hacia las microcuencas del municipio. Los parámetros numéricos aplicados se exponen en la **Tabla 4**.

Tabla 4 – Valores de aptitud para el criterio de Recursos hídricos (Ríos).

APTITUD TERRITORIAL	INTERVALO/ RANGO REAL	CALIFICACIÓN (NOTA)	VALOR PONDERADO (PESO: 20%)
Inapto	0 – 50m	0	0,00
Muy baja	50 – 200m	2	0,40
Media	200 – 500m	2	1,00
Alta	500 – 1000m	8	1,60
Ideal	> 1000m	10	2,00

Fuente: a autora 2026.

Tomando como base las zonas de amortiguamiento y las restricciones normativas detalladas en la **Tabla 4**, se generó el modelado cartográfico correspondiente. En la **Figura 4** se especializó el comportamiento del criterio de recursos hídricos, reflejando visualmente cómo la aptitud territorial aumenta a medida que el análisis se aleja de las Áreas de Preservación Permanente (APP).

Figura 4 - Mapa de Aptitud Ambiental para el criterio de Recursos Hídricos

Fuente: a autora 2026.

4.2.3 Criterio de inclinación (pendientes)

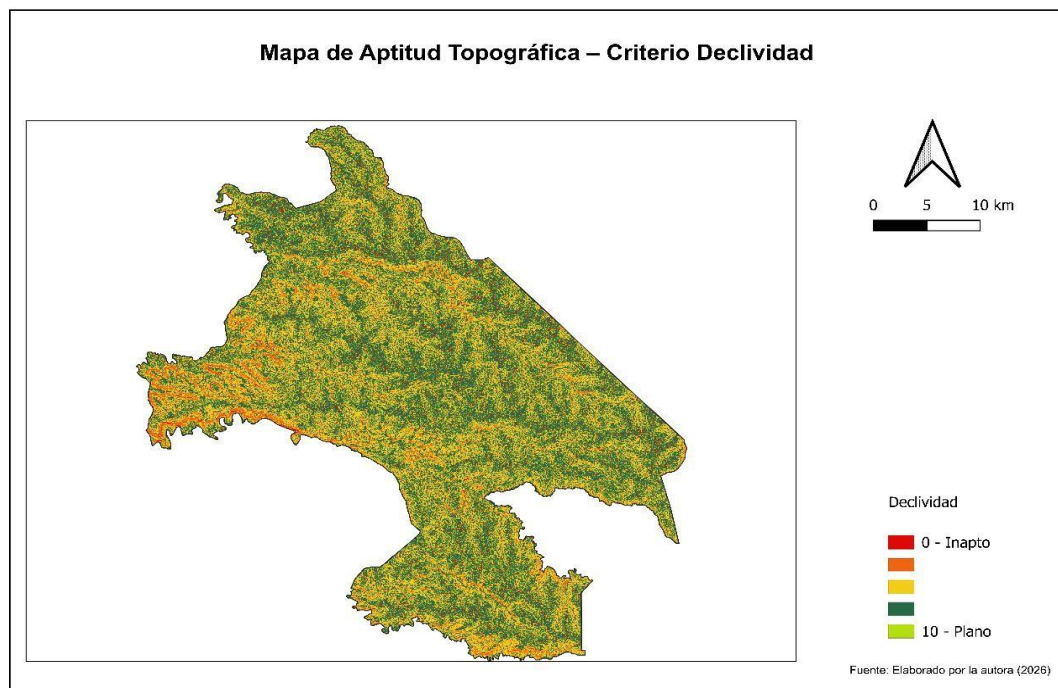
El análisis del relieve a partir del MDE ALOS PALSAR evidenció las ventajas del relieve del municipio de Toledo para el desarrollo de infraestructura industrial. Las zonas con topografía llana u llana-suave conforme a la clasificación Embrapa 1979, (0% - 3% y 3% - 8%) obtuvieron las calificaciones más elevadas (10 y 8, respectivamente) debido a la facilidad para ejecutar movimientos de tierras eficientes y garantizar la estabilidad mecánica de las losas de hormigón donde operará la maquinaria pesada de trituración. Las pendientes superiores al 45% fueron tipificadas como escarpadas e inaptas debido a las limitaciones operativas para camiones pesados cargados. Los valores aplicados se desglosan en la **Tabla 5**.

Tabla 5 – Valores de aptitud para el criterio de Inclinación (Pendientes)

APTITUD TERRITORIAL	INTERVALO/ RANGO REAL	CALIFICACIÓN (NOTA)	VALOR PONDERADO (PESO: 15%)
Plano	0% - 3%	10	1,50
Suave Ondulado	3% - 8%	8	1,20
Ondulado	8% - 20%	5	0,75
Fuerte Ondulado	20% - 45%	2	0,30
Escarpado/ Inapto	>45%	0	0,00

Fuente: a autora 2026.

A partir del procesamiento topográfico detallado en la **Tabla 5**, se derivó la cartografía del relieve municipal. En la **Figura 5** se representa la distribución espacial del criterio de pendiente, haciendo evidente desde una perspectiva geográfica cómo las zonas llanas optimizan las condiciones operativas para el transporte y la infraestructura, en contraste con las fuertes pendientes del terreno.

Figura 5 – Mapa de Aptitud Topográfica para el criterio de Pendientes

Fuente: a autora 2026.

4.2.4 Criterio de Uso y Ocupación del Suelo

La rasterización y reclasificación de la cobertura vegetal y zonificación territorial a partir de los datos consolidados de MapBiomias (Colección 9.0) y GeoToledo permitieron mapear las actividades permitidas. Las clases asociadas a áreas agrícolas y pasturas antropizadas (Códigos MapBiomias 46 y 48) recibieron la calificación de aptitud máxima (10). Por el contrario, los fragmentos forestales nativos, cuerpos de agua continentales y áreas naturales protegidas (Códigos 3, 9, 11, 12, 31, 33) se catalogaron como inaptos con el fin de priorizar la protección de la biodiversidad local y evitar pasivos ambientales. Los valores normativos indexados se detallan en la **Tabla 6**.

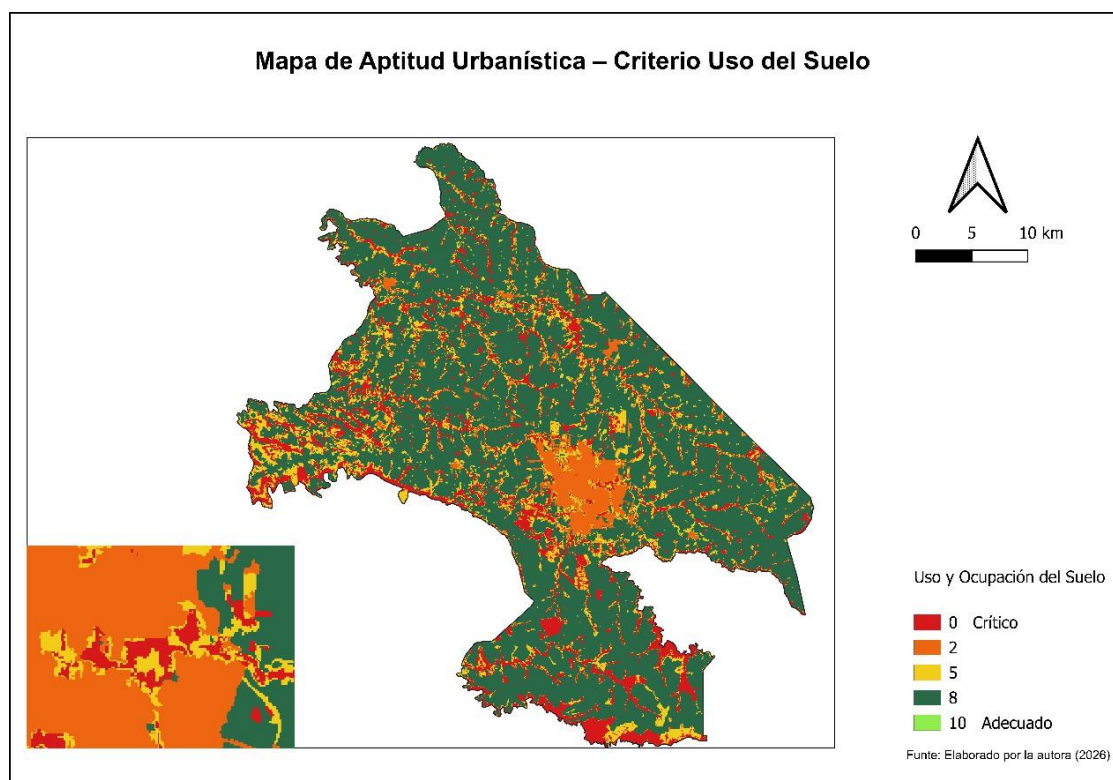
Tabla 6 – Valores de aptitud para el criterio de Uso y Ocupación del Suelo.

APTITUD TERRITORIAL	INTERVALO/ RANGO REAL	CALIFICACIÓN (NOTA)	VALOR PONDERADO (PESO 15%)
Ideal	Área Agrícola / Pastura Antropizada (Cód.: 46, 48)	10	1,50
Alta	Mosaicos de Usos Agrícolas o Urbanos (Cód.: 39, 41)	8	1,20
Media	Formaciones Suculentas / Silvicultura) (Cód.: 15, 21)	5	0,75
Baja	Áreas Urbanas No Consolidadas, (Cód.: 24, 25)	2	0,30
Inapto	Formación Forestal / Agua / Natural (Cód.: 3, 9, 11, 12, 31, 33)	0	0,00

Fuente: a autora 2026.

En función de la reclasificación y las normativas de zonificación indexadas en la **Tabla 6**, se generó la capa espacial definitiva para esta variable. En la **Figura 6** se visualiza el comportamiento del criterio de uso y ocupación del suelo, permitiendo identificar geográficamente la delimitación de las áreas con aptitud restrictiva frente a los sectores óptimos para el desarrollo de la infraestructura.

Figura 6 – Mapa de Aptitud Urbanística para el criterio de Uso del Suelo



Fuente: a autora 2026.

4.3 Integración logística y aplicación del filtro booleano urbanístico

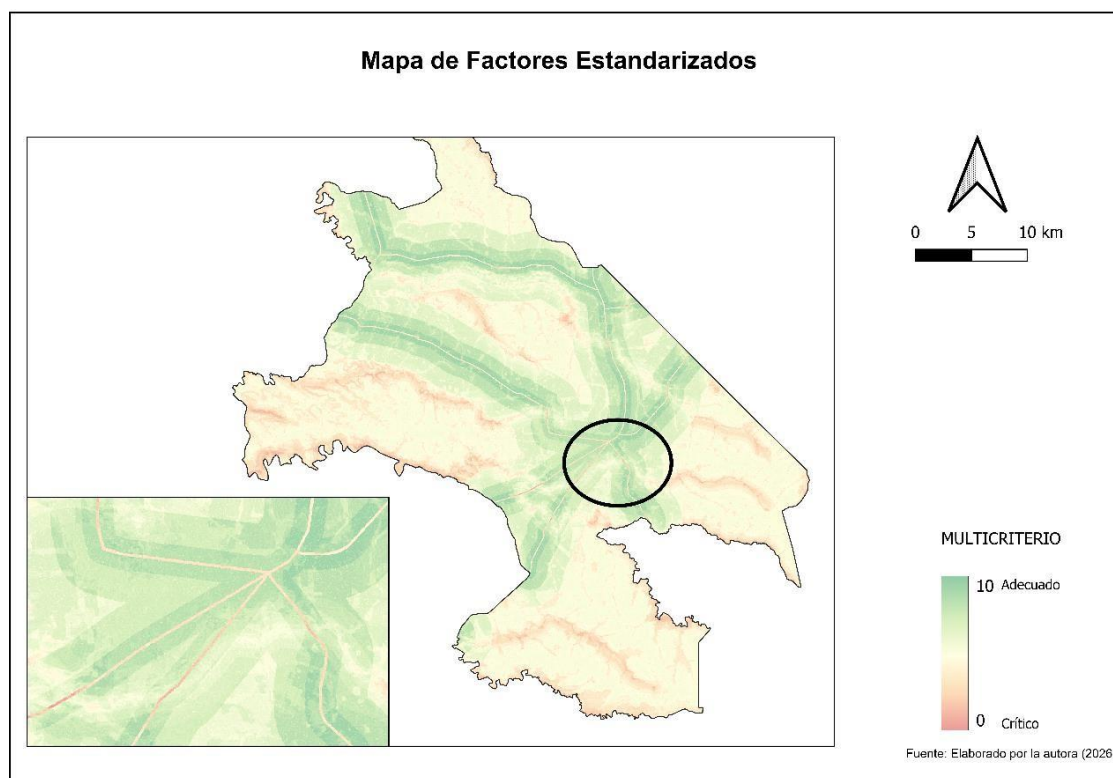
Una vez combinadas linealmente las capas ponderadas en la calculadora ráster mediante la ecuación de Combinación Lineal Ponderada (WLC), se aplicó la máscara digital binaria del Filtro Booleano $F_{Booleano}$, estructurada bajo las directrices de la Ley Complementaria nº 18/2018 (Plano Director Participativo del Municipio de Toledo).

La aplicación de esta lógica binaria (0 o 1) modificó el mapa de aptitud preliminar:

- Todas las áreas residenciales consolidadas, zonas de expansión urbana residencial, distritos escolares, complejos universitarios y el cono de seguridad del Aeropuerto Municipal de Toledo, fueron interceptados con un valor multiplicador de cero (0).
- Este procedimiento eliminó de forma absoluta los sectores de conflicto social o legal, aislando únicamente las macrozonas de desarrollo industrial, agroindustrial y áreas rurales sin restricciones de uso pesado.

Como paso previo a la exclusión legal, se consolidó el cruce de las variables físicas y ambientales del modelo. En la **Figura 7** se representa la espacialización del mapa de factores estandarizados y ponderados, exponiendo el gradiente continuo de aptitud preliminar antes de la restricción urbanística.

Figura 7 – Mapa Integrado de Factores Estandarizados

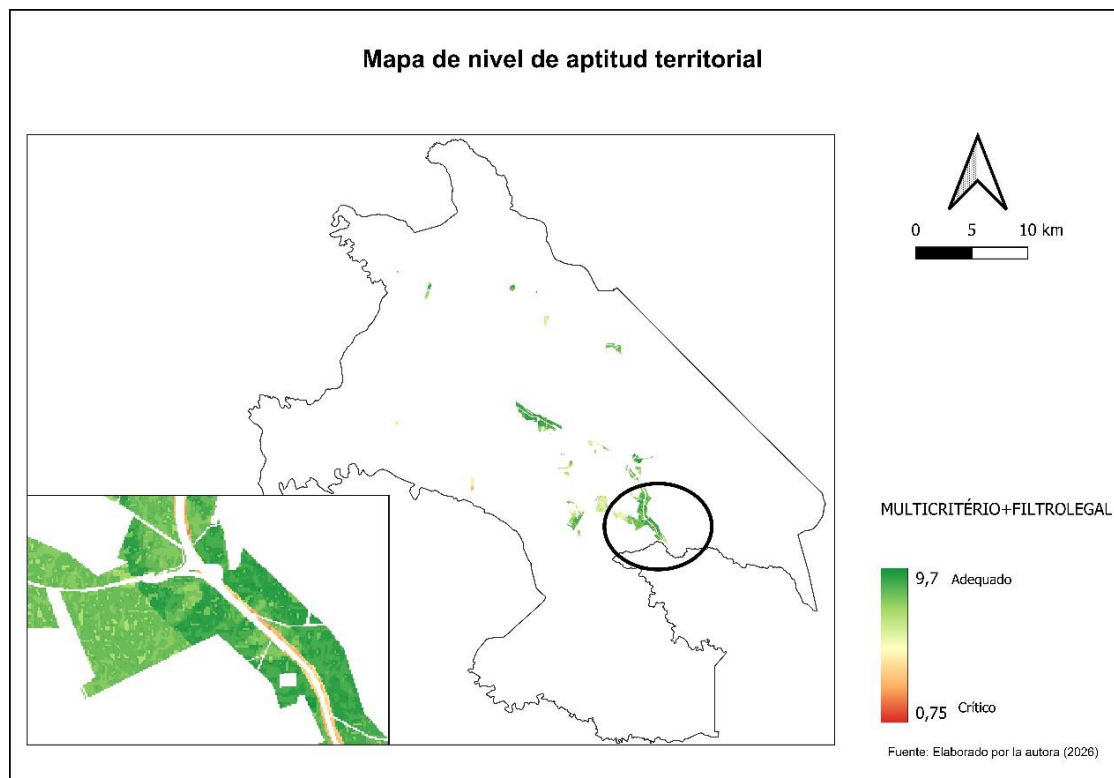


Fuente: a autora 2026.

Posteriormente, al aplicar la máscara restrictiva sobre la integración previa, se derivó el escenario de viabilidad real para el ordenamiento del territorio. En la

Figura 8 se visualiza el mapa de nivel de aptitud territorial final, donde se evidencia el efecto de supresión absoluta generado por el filtro booleano sobre el espacio geográfico.

Figura 8 - Mapa de Aptitud Territorial Final con Aplicación del Filtro Booleano Urbanístico



Fuente: a autora 2026.

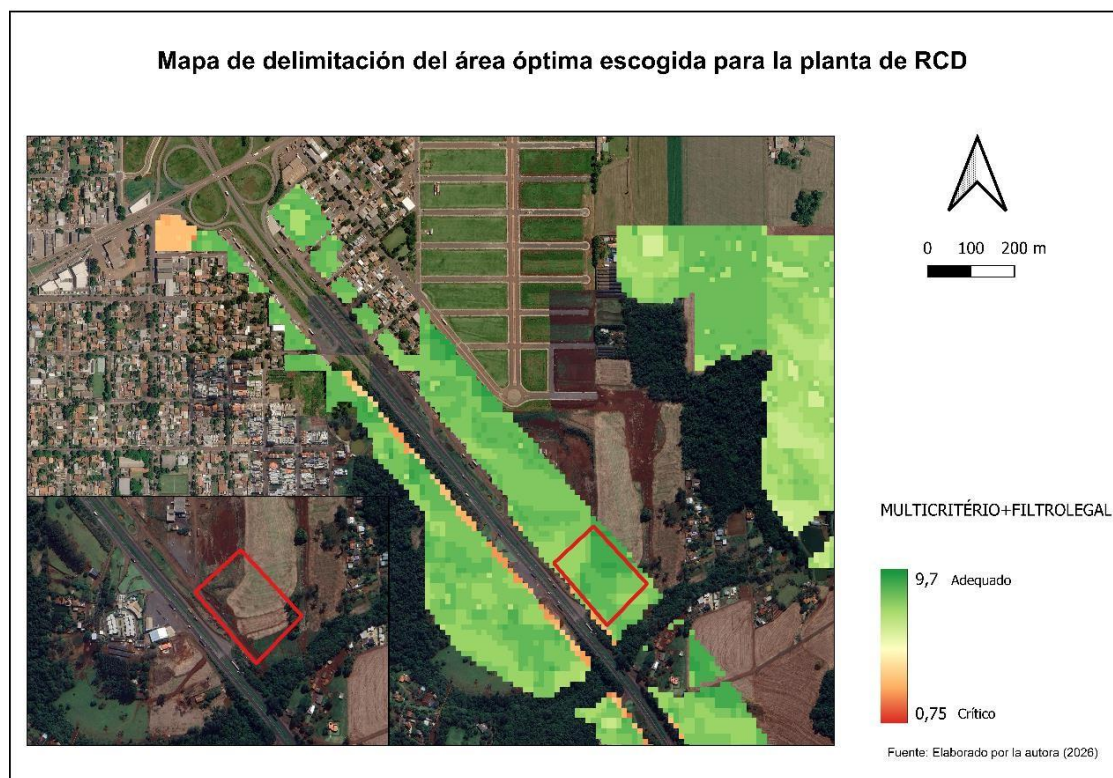
El mapa final de aptitud espacial sintetizado arrojó una puntuación máxima de 9.7 sobre 10 en las celdas más idóneas. Las áreas que alcanzaron este rango de excelencia se localizan de manera concentrada fuera de la periferia del área urbana densa de Toledo, adyacentes a los corredores de transporte de carga pesada.

Esta localización periférica responde con precisión a los objetivos de diseño de infraestructura de la investigación: proporciona un acceso inmediato a la red de carreteras regionales para la captación eficiente del flujo de escombros de las obras civiles urbanas, mientras que cumple con las distancias de aislamiento

necesarias frente a núcleos poblacionales, controlando los impactos de vecindad (ruido, polvo y tránsito pesado) en pleno alineamiento con la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS).

Con base en la convergencia de los criterios de máxima aptitud y la exclusión de las restricciones legales, se determinó la localización definitiva para la planta de valorización de RCD. El lote seleccionado se sitúa de forma estratégica sobre el corredor de la carretera federal BR-163, adyacente a la intersección con el Contorno Oeste (PR-182). En la **Figura 9** se expone la delimitación detallada y el entorno espacial del área óptima escogida.

Figura 9 – Mapa de delimitación del área óptima escogida para la planta de RCD



Fuente: a autora 2026.

Para la estimación del valor económico preliminar del suelo en el área seleccionada, se adoptó como criterio de referencia la Planta Genérica de Valores (PGV) del Municipio de Toledo, instrumento legal que sirve de base para el cálculo del Impuesto Predial y Territorial Urbano (IPTU) y el Impuesto de

Transmisión de Bienes Inmuebles (ITBI). Asimismo, el análisis se alineó con las directrices metodológicas de la norma ABNT NBR 14653-2, que regula la tasación de bienes inmuebles urbanos mediante el método comparativo directo de datos de mercado.

Al localizarse el lote óptimo en una macrozona de expansión industrial y logística adyacente a la carretera federal BR-163 y en las proximidades del Jardim Coopagro, se identifica una marcada tendencia de valorización del suelo impulsada por el flujo logístico regional. En este sector periurbano, el valor comercial de las áreas destinadas a galpones logísticos o industrias pesadas suele oscilar entre R\$ 150 y R\$ 350 por metro cuadrado, dependiendo directamente de la escala de la fracción y de la infraestructura de acceso vial disponible.

Para el correcto funcionamiento de una planta de reciclaje de RCD de escala industrial —que requiere albergar eficientemente sectores de recepción, báscula de pesaje, patios de clasificación de escombros en bruto, maquinaria de molienda y amplias áreas de almacenamiento para los diferentes agregados reciclados— se estima un requerimiento de superficie de entre 15.000 m² y 30.000 m² (equivalente a 1,5 o 3 hectáreas). Bajo estas dimensiones operativas y considerando los valores comerciales de la zona, la adquisición del terreno para el emplazamiento de la infraestructura demandaría una inversión total estimada de entre entre US\$ 440.000 y US\$ 2.050.000. La consideración de este rango variable y su contraste con los parámetros fiscales oficiales garantizan la viabilidad económica preliminar del emplazamiento propuesto, respaldando el proyecto bajo un marco normativo institucional y de mercado real.

5 CONSIDERACIONES FINALES

En la presente investigación se desarrolló e implementó un análisis espacial multicriterio integrado con Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el propósito de determinar la localización óptima para la implantación de una planta de reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el municipio de Toledo, Paraná. Tras la evaluación de las alternativas vectoriales y matriciales, se validó la configuración del modelo propuesto. Esta decisión estratégica partió de una premisa económica y logística crítica: la viabilidad operativa y el éxito financiero de un complejo destinado a la valorización de inertes dependen directamente de la minimización de las distancias de transporte y de la optimización del acarreo de la carga pesada.

Los productos cartográficos obtenidos demuestran la robustez y efectividad del modelo geoespacial estructurado, el cual logró integrar de manera armónica las restricciones fisiográficas del territorio con los marcos normativos locales. En la parametrización final del sistema, se otorgó una ponderación del 50% al criterio de accesibilidad y cercanía a la red vial nacional y estatal, un 20% a la distancia con respecto a los recursos hídricos superficiales, un 15% a las pendientes del relieve terrestre y un 15% a la compatibilidad del uso del suelo. Tras ejecutar la operación algorítmica en el programa, la matriz de comparación en parejas diseñada arrojó un Índice de Consistencia que resultó en una Razón de Consistencia (CR) de 0,02. Al representar un valor del 2%, significativamente menor al límite crítico del 10% establecido en la literatura técnica, quedó validada estadísticamente la distribución de pesos del modelo y se descartó cualquier tipo de aleatoriedad en los juicios.

Al cruzar algebraicamente estos planos de información, el modelo arrojó una calificación de aptitud máxima de 9.7 sobre una escala de 10. Las zonas ideales identificadas se localizan estratégicamente en las periferias del perímetro urbano de Toledo, lo que garantiza una conectividad y salida directa hacia las carreteras principales de la región (optimizando la logística inversa regional), al tiempo que resguarda el equilibrio ecológico y evita la introducción del tránsito de camiones de gran tonelaje en las vías urbanas colectoras y locales más transitadas.

Como un componente metodológico terminal y fundamental, se incorporó un filtro de exclusión estricto basado en las directrices de la Ley Complementaria nº 18/2018 (Plan Director Participativo do Município de Toledo) para otorgar seguridad jurídica al proyecto. Este geoprocusamiento restrictivo actuó como una máscara binaria booleana que anuló por completo (asignando un valor matemático de cero) todas las superficies asociadas a zonas residenciales densas, áreas comerciales, complejos universitarios y los conos de aproximación y seguridad del aeropuerto local. De este modo, el mapa de síntesis final respeta estrictamente el ordenamiento territorial del municipio y restringe las alternativas viables únicamente a los sectores destinados a actividades industriales y servicios pesados.

A partir de la convergencia de estos criterios de máxima aptitud y la supresión legal del filtro booleano, se determinó la localización definitiva para la planta de valorización. El lote óptimo seleccionado se sitúa de forma estratégica sobre el corredor de la carretera federal BR-163, adyacente a la intersección con el Contorno Oeste (PR-182) y en las proximidades del Jardim Coopagro.

Finalmente, la viabilidad económica del proyecto se consolida al evaluar este lote estratégico bajo los parámetros de la Planta Genérica de Valores (PGV) de Toledo y la norma ABNT NBR 14653-2. Al demostrarse que el área óptima se ubica en una franja periurbana donde el valor del suelo oscila entre R\$ 150 y R\$ 350 por metro cuadrado, se garantiza una adquisición territorial financieramente competitiva. De este modo, para la superficie industrial requerida (entre 15.000 m² y 30.000 m²), la inversión de capital necesaria para el terreno entre US\$ 440.000 y US\$ 2.050.000, se alinea con la lógica de minimización de costos iniciales, demostrando que la alternativa con mayor eficiencia técnica y ambiental es, simultáneamente, la solución más sostenible y atractiva desde la perspectiva del presupuesto y la inversión económica.

5.1 Sugerencia para trabajos futuros

Tomando en cuenta los alcances de esta investigación, se sugieren las siguientes líneas de estudio para continuar y profundizar el desarrollo de este tema:

Cálculo dinámico de la demanda: Desarrollar un análisis que mapee los focos reales de producción de escombros en Toledo. Así se podrá optimizar la localización de la planta utilizando formulaciones matemáticas basadas en el volumen real de residuos acumulado

- Análisis de redes viales (*Network Analysis*): Implementar herramientas avanzadas de SIG para simular el viaje real de los camiones, considerando el sentido de las calles, los límites de peso por eje, los tiempos de viaje y el tráfico para reducir los costos de transporte.
- Estudios de suelo y propiedad en el sitio: Realizar perforaciones y pruebas directas en los terrenos seleccionados por el modelo para revisar la resistencia del suelo. También se debe elaborar un estudio catastral para verificar los precios de la tierra y la disponibilidad de los lotes para su adquisición.

REFERENCIAS

ALMEIDA, Cláudia Maria de. **Introdução ao geoprocessamento e álgebra de mapas**. São José dos Campos: INPE, 2021.

ALMEIDA, Ricardo Santos. Processamento de dados ráster com software livre: aplicações práticas em QGIS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 27, n. 3, p. 1-29, sat. 2021.

ANGELIS, J. de; OLIVEIRA, L. S. de; SILVA, M. A. R. da. Logística reversa e sustentabilidade na gestão de resíduos da construção civil em municípios de médio porte. **Revista Brasileira de Engenharia Urbana e Regional**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 115-132, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO. **Diretrizes para implantação de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil**. São Paulo: ABRECON, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14653-2: Avaliação de bens - Parte 2: Imóveis urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BARBOSA, M. S.; SILVA, T. J. Escassez de agregados naturais e o papel estratégico da reciclagem de RCD na infraestrutura urbana moderna. *Revista de Engenharia Civil e Sustentabilidade*, v. 33, n. 1, p. 78-92, 2023.

BRASIL. [Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979]. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 117, nº 243, p. 19457, 20 dez. 1979.

BRASIL. [Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001]. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências [Estatuto da Cidade]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 139, nº 133, p. 1, 11 jul. 2001.

BRASIL. [Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010]. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 147, nº 147, p. 3, 3 ago. 2010.

BRASIL. [Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012]. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 4.774, de 20 de dezembro de 1965, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências [Novo Código Florestal Brasileiro]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 149, nº 102, p. 1, 28 maio 2012.

BRASIL. [Lei nº 13.913, de 25 de novembro de 2019]. Altera a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, para assegurar o direito de permanência de edificações na faixa não edificável contígua às faixas de domínio público de rodovias. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 156, nº 228, p. 2, 26 nov. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). [Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002]. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

CHAKHAR, S.; MOUSSEAU, V. Spatial multicriteria decision making: A review of methods and software tools. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 12, n. 1, p. 27-45, 2008.

CHRYSOCHOOU, M. *et al.* A GIS-based suitability assessment framework for brownfield redevelopment. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 107, n. 3, p. 211-224, 2012.

COBOS-MORA, F.; JORDAN, J.; GUINONEZ, M.; ESPINOZA, F. GIS-MCDA based modeling for the potential siting of construction and demolition waste recycling plants in urban growth corridors. **Waste Management**, New York, v. 182, p. 45-58, 2023.

DONEVSKA, K. R.; GORGOVSKI, M.; JOVANI, A. Landfill siting using GIS-based multi-criteria evaluation. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 7, n. 4, p. 312-327, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Miscelânea, 1).

FERREIRA, A. L.; GOMES, J. R. Análise de custos logísticos e fricção da distância no transporte de resíduos pesados em áreas periurbanas. *Revista Transportes e Logística*, v. 16, n. 3, p. 210-225, 2024.

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro. **Tomada de decisão em sistemas de informação geográfica**: o papel da análise multicritério. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y. Construction and demolition waste management studies: A scientific roadmap based on circular economy principles. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 284, art. 124713, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico 2022: População e domicílios: Primeiros resultados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama do Município de Toledo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2026.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - IPARDES. **Caderno Estatístico do Município de Toledo**. Curitiba: IPARDES, 2024.

JÚNIOR, Alcir Antunes; SOUZA, Roberto de. Planejamento logístico na destinação de resíduos sólidos da construção civil em áreas urbanas. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 211-225, maio/ago. 2016.

MADI, A. H.; SROUR, G. M. Avaliação gravimétrica e densidade econômica dos resíduos minerais da construção civil em polos regionais. **Revista de Engenharia e Tecnologia Ambiental**, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 204-218, 2018.

MALCZEWSKI, J. **GIS and Multicriteria Decision Analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. New York: Springer, 2015.

MARCHESI, M. *et al.* Diretrizes para a localização de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil utilizando SIG. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 5, n. 2, p. 45-58, 2018.

MARCHESI, M. *et al.* Método para escolha de locais para implantação de redes de reciclagem de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 55-72, abr./jun. 2018.

MARTINS, E. F. Modelagem multicritério e tomada de decisão pública no planejamento de infraestruturas sustentáveis. *Engenharia Ambiental e Sanitária*, v. 40, n. 2, p. 144-159, 2022.

MUNICIPIO DE TOLEDO. [Lei Complementar nº 18, de 20 de dezembro de 2018]. Dispõe sobre o Plano Diretor Participativo do Município de Toledo, Estado do Paraná. **Órgão Oficial do Município**, Toledo, 2018.

OLIVEIRA, Fernanda Regina de. **Modelagem espacial multicritério para seleção de áreas destinadas a usinas de reciclagem de resíduos da construção civil**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

RODRIGUES, Amanda Luísa; SILVEIRA, João Pedro. Otimização logística no transporte de resíduos de construção e demolição utilizando ferramentas SIG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. 509-518, jul./ago. 2020.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

SAATY, Thomas L. **The Analytic Hierarchy Process**: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, Thomas L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SANTOS, Carlos Alberto dos; SILVA, Marcelo Almeida. Análise multicritério assistida por SIG para localização de infraestruturas de resíduos sólidos urbanos. **Revista de Geografia**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 45-63, jan./abr. 2017.

SANTOS, J. R.; FERREIRA, L. M. Análise multicritério aplicada à localização de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 13, e20200115, p. 1-16, 2021.

SANTOS, T. R. dos; MENDONÇA, P. H.; SOUZA, R. G. do. Propriedades mecânicas e microestruturais dos agregados reciclados de matriz cimentícia: Uma revisão técnica integrada conforme as diretrizes da NBR 15116. **Matéria** (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, e12502, 2019.

SILVA, J. P.; OLIVEIRA, M. R. Crescimento urbano médio e os impactos na geração de resíduos da construção civil em municípios polo. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 29, n. 3, p. 312-325, 2024.

SOUZA, Mariana Costa; MELLO, Lucas Ribeiro. Economia circular e a reciclagem de RCD no estado do Paraná: panorama e perspectivas legais. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 11, n. 2, p. 104-123, abr./jun. 2022.

SOUZA, V. A. de; FERREIRA, G. L.; LIMA, J. R. Análise espacial e logística reversa de resíduos pesados inertes: integração SIG MCDA para infraestruturas sustentáveis. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 27, n. 1, p. 89