

ROTEIRIZAÇÃO DA COLETA SELETIVA COM O USO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO EM UM MUNICÍPIO DE PEQUENO PORTE DEMOGRÁFICO

Renan Thulio Rodrigues **Pena**¹, Roseli Mendonça **Dias**², Luciany Oliveira **Seabra**³

(1 – Universidade Federal de Uberlândia, <https://orcid.org/0000-0002-0211-4146>, renan.thulio@ufu.br, 2 – Universidade Federal de Uberlândia, <https://orcid.org/0000-0002-7695-3460>, rmdias@ufu.br, 3 – Universidade Federal de Uberlândia, <https://orcid.org/0000-0003-1821-1917>, lucianyseabra@ufu.br)

Resumo: A gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos intensificaram-se com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305 de 2010, a qual tem como um de seus instrumentos a coleta seletiva. O desempenho da coleta seletiva está associado, dentre outros fatores, à rota seguida pelos caminhões de coleta dos resíduos sólidos recicláveis pelas ruas da cidade. O objetivo deste estudo foi realizar o mapeamento das rotas de coleta seletiva no município de Monte Carmelo – MG com o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), visando as melhores alternativas econômicas e de logística para os trajetos da coleta. Foram definidos vinte Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) e com o auxílio dos softwares QGIS 3.16.5 e ArcGIS 10.0 foram gerados os mapas de roteirização da coleta seletiva. A amplitude e condições reais de deslocamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos recicláveis foram visualizadas por meio da representação da rede e a identificação dos PEVs. Duas rotas foram traçadas, sendo a Rota I para dez PEVs, com distância total de 23 km e tempo total de 39 minutos, e a Rota II para outros dez PEVs, com distância total de 21 km e tempo total de 37 minutos.

Palavras-chave: Coleta seletiva. Roteirização. Sistemas de Informações Geográficas.

ROUTING OF SELECTIVE WASTE COLLECTION USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS: CASE STUDY IN A SMALL POPULATION MUNICIPALITY

Abstract: Integrated and solid waste management have been intensified with the institution of the National Policy on Solid Waste Management, Law No. 12.305 of 2010, which instrumentalized

selective waste collection. The route taken by recyclable solid waste collection trucks through the city streets is one of the factors that impact the performance of selective waste collection. The objective of this study was to map the selective waste collection routes in the municipality of Monte Carmelo, MG, using Geographic Information Systems (GIS), aiming at the best economic and logistical alternatives for the collection routes. Twenty Voluntary Drop-Off Points (VDPs) were defined and, with the help of QGIS 3.16.5 and ArcGIS 10.0 software, the selective waste collection routing maps were generated. The amplitude and real displacement conditions of recyclable solid waste collection vehicles were visualized through the representation of the network and the identification of the VDPs. Two routes were traced, Route I for ten VDPs, with a total distance of 23 km and a total time of 39 minutes, and Route II for another ten VDPs, with a total distance of 21 km and a total time of 37 minutes.

Keywords: Selective waste collection. Routing. Geographic Information Systems.

ENRUTAMIENTO DE LA RECOGIDA SELECTIVA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: ESTUDIO DE CASO EN UNA CIUDAD DE PEQUEÑA DEMOGRÁFIA

Resumen: La gestión y el manejo integrado de los residuos sólidos se intensificaron con la institución de la Política Nacional de Residuos Sólidos, Ley nº. 12305 de 2010, que tiene la recogida selectiva como uno de sus instrumentos. El desempeño de la recogida selectiva está asociado, entre otros factores, a la ruta de los camiones recolectores de residuos sólidos reciclables por las calles de la ciudad. El objetivo de este estudio fue definir las rutas de recogida selectiva en el municipio de Monte Carmelo - MG utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), buscando las mejores alternativas económicas y logísticas para las rutas de recogida. Se definieron veinte Puntos de Entrega Voluntarios (PEVs) y, con la ayuda del software QGIS 3.16.5 y ArcGIS 10.0, se generaron los mapas de ruta de recogida selectiva. La amplitud y las condiciones reales de desplazamiento de los vehículos recolectores de residuos sólidos reciclables se visualizaron a través de la representación de la red y la identificación de los PEVs. Se trazaron dos rutas, la Ruta I para diez PEVs, con una distancia total de 23 km y un tiempo total de 39 minutos, y la Ruta II para otros diez PEVs, con una distancia total de 21 km y un tiempo total de 37 minutos.

Palabras clave: Recogida selectiva. Enrutamiento. Sistemas de Información Geográfica.

Introdução

O aumento da geração de resíduos tem proporcionado consequências agravantes ao meio ambiente. Conforme aumento da população e área urbana, maior a geração de resíduos e a distância a ser percorrida pelo veículo coletor. Em geral, os resíduos sólidos domiciliares e resíduos públicos são levados aos aterros controlados ou sanitários localizados em áreas afastadas da cidade, isso implica em elevação nos gastos com os transportes, bem como maior emissão de gases poluentes lançados pelos veículos nos deslocamentos.

No Brasil foram estimadas 48,13 milhões de toneladas de resíduos domiciliares e públicos dispostas em aterros sanitários no ano de 2019 (BRASIL, 2020). O indicador médio de coleta per capita brasileiro é de 0,99 kg/hab./dia para a massa de resíduos domiciliares e públicos coletados nesse mesmo ano. O serviço de coleta seletiva estava presente em 38,7% dos municípios brasileiros e a massa coletada de resíduos recicláveis foi de 13,5 kg/hab./ano, equivalente a 1,6 milhão de toneladas coletada seletivamente em 2019, ou seja, para cada 10 kg de resíduos disponibilizado para a coleta, apenas 374 gramas são coletadas de forma seletiva, assim, embora a coleta seletiva esteja avançando no país, ainda se encontra muito abaixo do desejável (BRASIL, 2020).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos foi instituída pela Lei nº 12.305 em 2 de agosto de 2010, dispondo sobre seus princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). A referida Lei nº 12.305 de 2010, define os resíduos sólidos de forma mais abrangente:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, e cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

A coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição é denominada como coleta seletiva pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Com o intuito de diminuir a quantidade de resíduos dispostos de forma ambientalmente inadequada, a coleta seletiva evita que material reciclável seja direcionado aos

aterros ou lixões, reduz o consumo de recursos naturais e colaboram para a reciclagem de resíduos e preservação ambiental (BORTOLI, 2013). A coleta seletiva além de existir no município, deve se tornar eficiente para que esses benefícios sejam obtidos.

Desse modo, a coleta seletiva implica que os geradores separem previamente seus resíduos, tornando necessária a conscientização da população sobre os problemas de poluição causados por destinação incorreta dos resíduos (SANTAELLA et al., 2014). Além disso, a coleta seletiva objetiva a seleção dos resíduos buscando um reaproveitamento destes, o que não acontece na coleta convencional (OLIVEIRA, 2011). No sistema de coleta seletiva os resíduos podem ser coletados por entrega voluntária em postos de coleta, recolhimento porta a porta por veículos públicos e contratação de particulares para a captação dos resíduos (RODRIGUES & SANTANA, 2012).

Quando os materiais recicláveis existentes nos resíduos domiciliares são separados pela população para que sejam coletados por um veículo especializado, denomina-se modalidade porta a porta. Quando a população realiza o descarte dos materiais separados em suas residências nos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs ou Ecopontos), a modalidade é denominada PEVs, os quais são alocados onde há fácil acesso e grande fluxo de pessoas (BERNARDO & LIMA, 2017).

A falta de planejamento de rotas de coleta no espaço urbano pode causar dispêndios financeiros e ambientais. Portanto, há uma necessidade crescente de desenvolvimento de modelos de roteamento eficazes para otimizar as distâncias percorridas, o impacto ambiental e os custos de investimento na coleta dos resíduos sólidos (DOTOLI & EPICOCO, 2017). Para analisar a maneira como os deslocamentos ocorrem e as alternativas de rotas, é necessário modelar a rede de transportes. Teodorovic (1986), define uma rede de transportes como um conjunto de nós e arcos, nos quais os deslocamentos são realizados. Os nós são considerados importantes pontos no espaço e os arcos são ligações físicas entre os nós. Essas estruturas de dados são espacializadas e representam as regras que governam viagens sobre uma rede viária. As regras são inseridas na rede e permitem identificar as opções de rotas nas vias urbanas.

A exatidão na estimativa do tempo de viagem, a qual é necessária para evitar que os cálculos sejam subestimados ou superestimados, conduzindo a subutilização dos veículos, e a qualidade da solução, permitindo mais detalhes na configuração da rota para todos os nós e links possíveis na rede, são os motivos para o uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) na roteirização (ASSAD, 1988).

Os SIGs integram dados de diversas fontes e criam bancos de dados georreferenciados, permitindo análises complexas (CÂMARA & MEDEIROS, 1998). Os SIGs resultam da combinação de tecnologias de sensoriamento remoto, sistema de posicionamento global (GPS) e geoprocessamento para o tratamento da informação geográfica, o que permite identificar as características das cidades e tratar estes dados, viabilizando a avaliação das variáveis que mais contribuem para a redução dos custos no transporte, como declividade, menores distâncias e impedâncias (CÂMARA et al., 2001).

A utilização adequada de técnicas de SIG pode maximizar a eficiência do sistema de gestão de resíduos (SINGH, 2019) e torna eficaz o planejamento e a implementação de um sistema de coleta e transporte (NITHYA et al., 2012).

A revisão bibliográfica sobre o tema mostrou que o SIG é muito utilizado na roteirização da coleta de resíduos sólidos. A roteirização é o processo de determinação de rotas de paradas a serem desempenhadas por veículos de uma frota, objetivando atender um conjunto de nós geograficamente dispersos, em locais pré-definidos (PAULA, 2009). Cada PEV é um nó na roteirização. A modalidade através de PEVs torna-se mais viável, visto que realizar a coleta seletiva na modalidade porta a porta, com o caminhão percorrendo todas as vias, demandará mais despesas com o transporte (BERNARDO & LIMA, 2017).

A diminuição do tempo de viagem, distância total, consumo de combustível e emissões de poluentes e eficiência da coleta podem ser obtidas e melhoradas com a otimização da rota (CHALKIAS & LASARIDI, 2009; HANNAN et al., 2020). O uso de SIG para a roteirização da coleta seletiva proporciona identificar um percurso ótimo ou econômico, com menor custo e obedecendo às restrições de movimentação dos veículos pelas ruas (PASCOAL JÚNIOR & OLIVEIRA FILHO, 2010). Desse modo, o uso de *software* adequado para a otimização de rota permite o desenvolvimento de vários modelos de coleta e transporte de resíduos sólidos (KALLEL, 2016), inclusive para a coleta seletiva.

Nesse contexto, este estudo teve o objetivo de realizar o mapeamento das rotas de coleta seletiva do município de Monte Carmelo – MG com o uso de Sistemas de Informações Geográficas.

Área de estudo

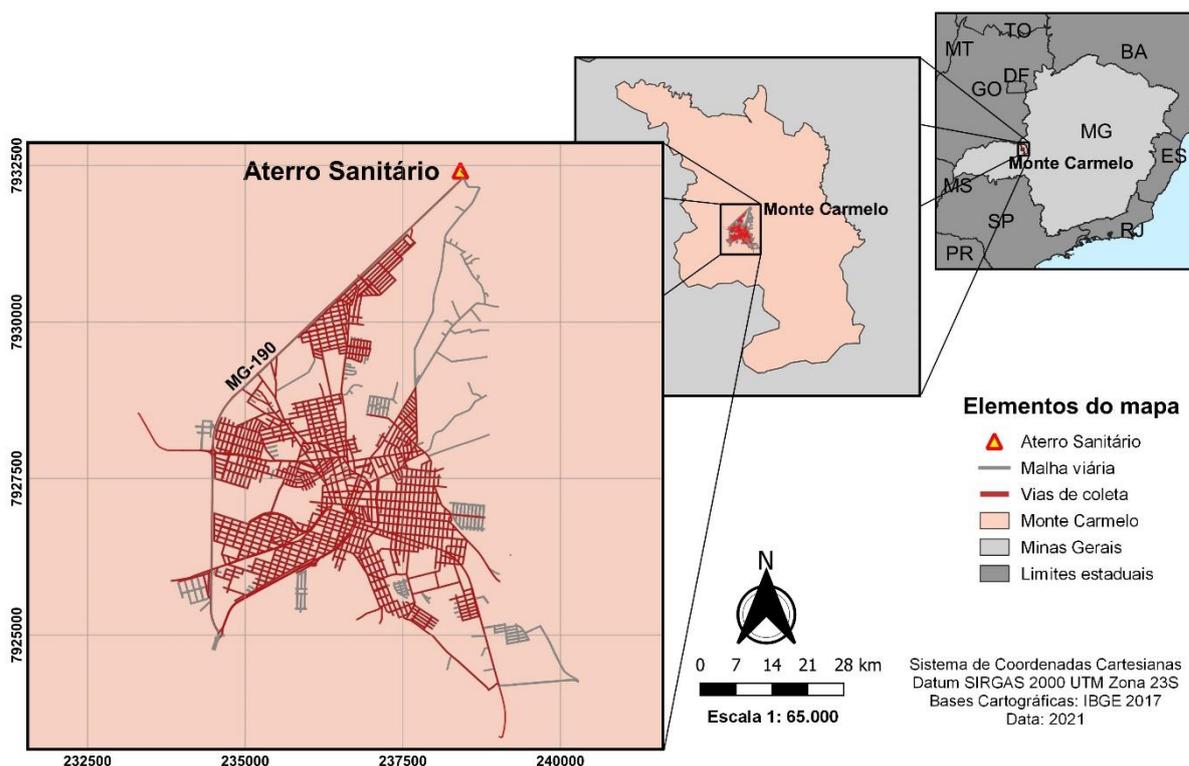
O município de Monte Carmelo está localizado na região do Triângulo do Norte, em Minas Gerais, Brasil (Figura 1). O município possui uma área total de aproximadamente 1.343

km² e é de pequeno porte demográfico, com uma população de 45.772 pessoas, sendo 87,6% da população residente na área urbana, de acordo com o Censo 2010 (IBGE, 2011). A estimativa da população para o ano de 2021 é de 48.049 pessoas (IBGE, 2021).

O Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) administra o aterro sanitário, que recebe os resíduos sólidos coletados no município e que está localizado fora do perímetro urbano, nas imediações da rodovia MG-190. Além do sistema de coleta dos resíduos sólidos domiciliares e públicos porta a porta, existe a coleta seletiva por Pontos de Entrega Voluntária (PEVs ou Ecopontos), especificados pela Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos e Rurais do município. Todos os resíduos sólidos coletados são levados para o aterro sanitário do município.

Figura 1 – Localização da área de estudo no município de Monte Carmelo – MG.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE MONTE CARMELO - MG



Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com os dados disponíveis na Série Histórica do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a quantidade anual de resíduos sólidos domiciliares (RDO) e resíduos públicos (RPU) recebida na unidade de processamento do município de Monte Carmelo – MG em 2011 foi de 12.836 toneladas, e em 2019 passou para 20.721 toneladas (BRASIL, 2021). Nesta mesma Série Histórica não há informações sobre o

quantitativo de resíduos sólidos do serviço de coleta seletiva. Observa-se, portanto, um aumento expressivo na produção dos resíduos sólidos do município na última década.

O aumento no volume de resíduos sólidos gerados nas áreas urbanas pode ser justificado pela inflação populacional, a elevação do padrão de vida nas cidades, a expansão das áreas urbanas e as mudanças no comportamento de consumo (GUIMARÃES, et al., 2010; POTDAR et al., 2016; HATAMLEH et al., 2020). Estratégias de redução e gestão de resíduos sólidos e melhorias nos serviços de coleta desses resíduos são necessárias para a proteção das cidades dos perigos relacionados aos resíduos e para o meio ambiente (RAI, et al., 2019).

Desse modo, devido ao aumento populacional e aumento das demandas por infraestruturas e serviços, entre eles os relacionados à ampliação da malha viária e ao gerenciamento dos resíduos sólidos, verifica-se a necessidade do planejamento da coleta seletiva a partir de um estudo sobre a roteirização da coleta e modelagem da rede de transportes para o município de Monte Carmelo – MG. Visa-se atender questões ambientais e econômicas, a partir da otimização das rotas com a redução do tempo de deslocamento, custos e poluição, e o papel social da educação e conscientização e de uma ferramenta de apoio a tomada de decisão para técnicos e gestores.

Material e Métodos

Etapas da pesquisa

Para a roteirização da coleta seletiva do município de Monte Carmelo- MG, foram definidas seis etapas de trabalho (Figura 2).

Figura 2 – Etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Primeira etapa

Esta etapa consistiu no estudo da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305 de 2010) e na definição da modalidade da coleta seletiva e identificação dos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) de resíduos sólidos recicláveis no município de Monte Carmelo – MG. A lista destes PEVs foi disponibilizada pela Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos e Rurais do município. Os pontos foram determinados pela secretaria e distribuídos pela extensão urbana.

Segunda etapa

Utilizou-se os *softwares* de SIG QGIS 3.16.5 e ArcGIS 10.0. Foi feita a análise da capacidade de cada um para atender ao objetivo deste estudo. Esses *softwares* são os mais conhecidos e utilizados na atualidade, pela sua eficiência e praticidade quanto a quantidade de recursos disponíveis para manipulação de geodados e munidos de diversos complementos.

Na mesma etapa, fez-se necessário a coleta de dados geográficos de fontes confiáveis, nesse caso, bases geográficas disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), que fornece dados e informações geográficas livres através do seu próprio site. Foi realizado *download* de arquivos, compatíveis com os *softwares* citados no

formato *shapefile*, dos limites estaduais de Minas Gerais, limites municipais de Monte Carmelo e logradouros do ano de 2017. Esses dados georreferenciados no *datum* SIRGAS 2000 e projetados em UTM Zona 23S e o *software* QGIS foram necessários para a confecção do mapa de localização da área de estudo no município e para criação de duas novas camadas *shapefile* denominadas PEV e Partida/Despejo, que representaram as localizações de cada ponto ao longo das vias de coleta.

Terceira etapa

Esta etapa se refere à criação rede de transportes. Nesta etapa foi criada uma nova camada *shapefile*, denominada Sistema Viário, essa a mais importante no plano do processo de roteirização, que consistiu em linhas vetorizadas que caracterizaram todas as vias disponíveis para tráfego na cidade, por onde será realizado o transporte dos resíduos sólidos pelo veículo coletor. Com base nas informações visuais e geográficas da malha viária foi possível criar essa representação, nomeá-las (inserindo os nomes reais de cada via) e interligá-las às camadas de pontos criadas.

Quarta etapa

Esta etapa consistiu no uso do *software* ArcGIS 10.0, que possui recursos para criação da roteirização desejada através do complemento *Network Analyst*. Primeiramente, utilizou-se da camada *shapefile* Sistema Viário e foram implementados novos campos, na sua tabela de atributos, nomes das vias, informações de velocidades, tempo e distância.

Os nomes das vias foram identificados e usados através do complemento no QGIS 3.16.5. Os campos de velocidades para vias foram criados seguindo as normas regulamentadoras de limites de velocidades no perímetro urbano, estabelecidas pelo Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997). Campos de distâncias foram calculados pela ferramenta de cálculo de geometria dentro da tabela de atributos (*Calculate Geometry*). Nesta etapa foram consideradas as impedâncias, que representam qualquer tipo de oposição ao movimento e podem ser definidas como um conjunto de variáveis, como distância, tempo de viagem e custo de transportes. Com o uso da calculadora de campo (*Field Calculator*) foram calculadas relacionando dados de distância e velocidade.

Quinta etapa

Iniciou-se as configurações necessárias para manipulação dos recursos de roteirização do *software*. No ícone do aplicativo *ArcCatalog*, escolheu-se um local seguro de armazenamento e criou-se um *Personal Geodatabase* e uma *Feature Dataset* sobre o mesmo, essa necessária para controlar os recursos de extensão de arquivos para roteirização.

Importou-se então para dentro de *Feature Dataset* a camada *shapefile* Sistema Viário (*Feature Class (single)*) e criou-se um novo conjunto de dados de rede (*New Network Dataset*).

Esse procedimento foi necessário para modelagem da rede de transportes para que a ferramenta considere todos os vértices (nós) nas linhas do sistema viário. Informações de tempo e distância foram utilizadas para configuração da impedância das rotas e os nomes das vias incluídos nas configurações para representação das direções (*Directions*) de um ponto para outro. Todas essas informações já existentes na tabela de atributos da camada.

Como os PEVs foram determinados pela Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos e Rurais do município, distribuídos pela extensão urbana, e considerando que o município conta com apenas um caminhão para realização da coleta seletiva, optou-se pela distribuição dos PEVs em duas rotas. A Rota I abrange os PEVs localizados na região mais ao sul do município e a Rota II abrange os PEVs localizados na região mais ao norte do município, cada rota de coleta seletiva poderá ser realizada alternando-se em dois dias da semana.

Com as devidas configurações, foi acessado o complemento *Network Analyst* e criou-se uma nova rota (*New Route*). Foram introduzidos nas paradas (*Stop*) os pontos de partida e despejo (Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos e Rurais e Aterro Sanitário, respectivamente) e os pontos intermediários (PEVs). Feito isso, utilizou-se *Solve* para calcular as rotas desejadas, configuradas para determinar a menor distância percorrida, representadas por linhas destacadas e suas direções (*Directions*) em informações textuais.

Sexta etapa

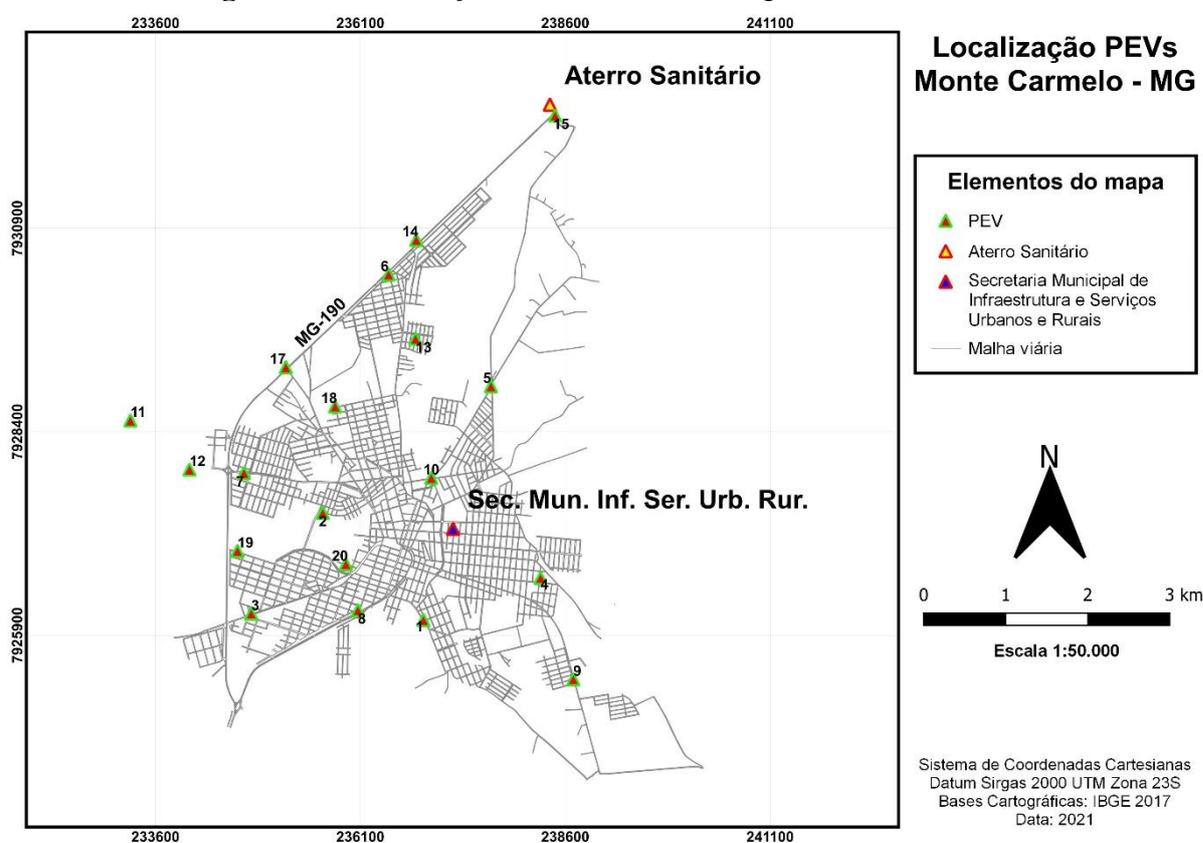
Após geradas as rotas otimizadas da coleta seletiva e as informações específicas do sentido de tráfego, nomes das vias, velocidades, distâncias e tempo, foi realizada a análise dos resultados. Observou-se a escolha de cada uma das duas malhas de pontos e o sequenciamento de cada ponto por rota.

Resultados e Discussão

Distribuição dos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs)

A modalidade da coleta seletiva foi a de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), caracterizando a roteirização em nós. Ao espacializar os PEVs pela extensão urbana do município de Monte Carmelo – MG, observa-se que os pontos atuais (20 PEVs) estão distribuídos de modo que várias regiões da área urbana possam ser atendidas pela coleta seletiva (Figura 3).

Figura 3 – Localização dos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a Rota I, a menor distância entre os PEVs, 1.042 m, ocorreu entre o PEV 01 e o PEV 08, já a maior distância foi entre o PEV 16 e o PEV 01, sendo 4.074 m. Para a Rota II, 981 m foi a menor distância encontrada entre o PEV 13 e o PEV 06, e a maior distância entre os PEVs, 4.551 m, ocorreu entre o PEV 19 e o PEV 11 (Tabela 1).

Observa-se a necessidade de adição de novos PEVs para a coleta seletiva do município de Monte Carmelo – MG, para que as distâncias entre eles sejam mais curtas. Uma pequena distância dos usuários aos PEVs é um incentivo à participação da população nos programas de

coleta seletiva, sendo a distância ideal de 300 metros e a máxima de 500 metros para participação do usuário apenas por caminhada (PEIXOTO, CAMPOS & D'AGOSTO, 2006).

Tabela 1 – Distâncias entre PEVs

Rota I		Rota II	
	Distância (m)		Distância (m)
PEV 04	1.345	PEV 05	1.351
PEV 09		PEV 10	
PEV 09	2.159	PEV 10	3.155
PEV 16		PEV 19	
PEV 16	4.074	PEV 19	4.551
PEV 01		PEV 11	
PEV 01	1.042	PEV 11	1.035
PEV 08		PEV 12	
PEV 08	1.508	PEV 12	2.013
PEV 03		PEV 17	
PEV 03	1.832	PEV 17	1.339
PEV 20		PEV 18	
PEV 20	1.252	PEV 18	1.645
PEV 02		PEV 13	
PEV 02	1.437	PEV 13	981
PEV 07		PEV 06	
PEV 07	4.051	PEV 06	2.881
PEV 14		PEV 15	

Fonte: Elaborada pelos autores.

Rotas geradas para a coleta seletiva

O roteamento gerado para a coleta seletiva do município de Monte Carmelo – MG teve como resultado específico a impedância de menor distância de coleta para duas rotas sequenciadas a critério de visualização, apoiada pelo mapa de localização dos PEVs gerado (Figura 3) e considerando a disponibilidade de um caminhão para percorrer a extensão urbana do município para realização da coleta seletiva. Com base na informação da Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos e Rurais que distribuiu 20 PEVs pela extensão urbana do município, foram consideradas duas malhas com igual quantidade de PEVs, onde na Rota I estão os PEVs localizados na região mais ao sul do município e na Rota II estão os PEVs localizados na região mais ao norte do município, cada rota com 10 PEVs. O *software* atendeu ao objetivo, identificando a melhor rota de um PEV para outro e assim, sucessivamente, para todos os PEVs. As Rota I e Rota II foram, portanto, definidas (Figuras 4 e 5).

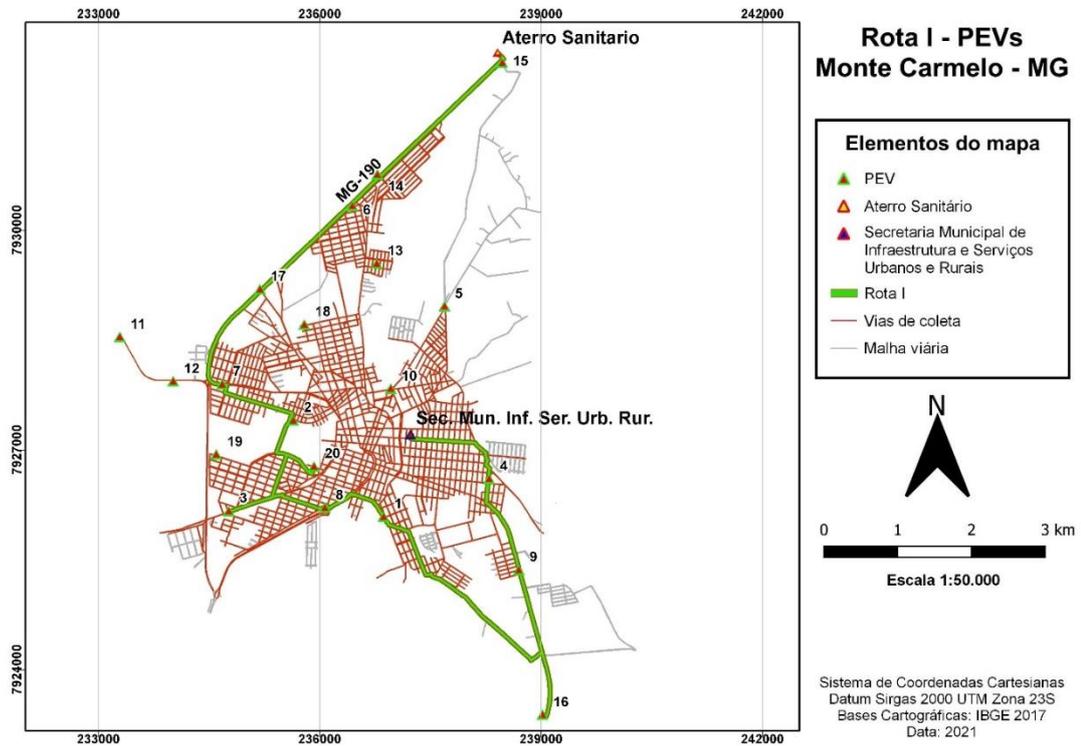
Nota-se que nas duas rotas geradas há PEVs que ficam próximos do percurso de ambas, porém, ressalta-se que esses pontos não são visitados nas duas rotas, uma vez que o recolhimento dos resíduos sólidos recicláveis de determinado local será atendido somente em

sua rota específica. Essa questão envolve o fato da localização do despejo (aterro sanitário) e a relação que a própria via tem na impedância da relação entre velocidade, tempo e distância, visto que a via considerada é uma rodovia com velocidade máxima de 80 km/h, o que torna a escolha da via pelo *software* como escolha principal. De acordo com Abousaeidi et al. (2016), as rotas mais rápidas serão encontradas pelo processo de roteamento de veículos.

As rotas geradas através da ferramenta *Network Analyst* foram eficientes quando consideradas as distâncias entre pontos, definindo o melhor caminho para um destino específico, como uma rede de transportes de coleta de resíduos sólidos.

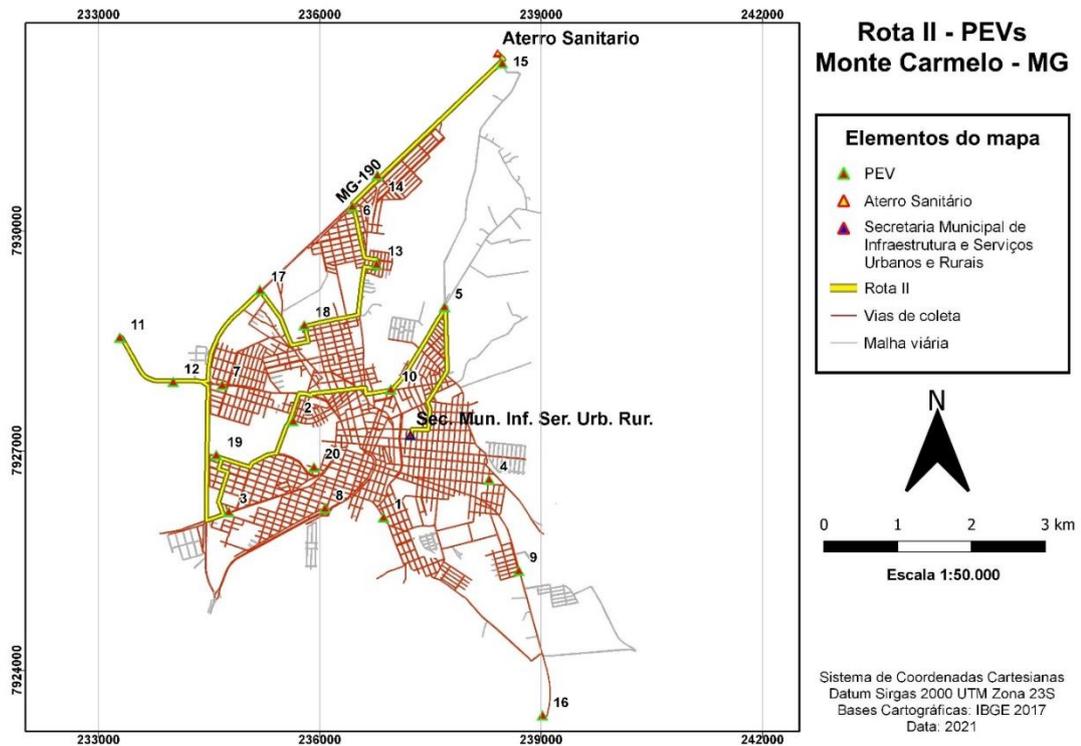
A aplicação do *Network Analyst* do *software* ArcGIS permite modelar dinamicamente condições da rede realistas, incluindo restrições de curvas e altura e condições de tráfego (ESRI, 2011). O complemento *Network Analyst* do ArcGIS para otimização da coleta e transporte de resíduos sólidos foi utilizado por Ghose et al. (2006), Chalkias & Lasaridi (2009) e Hatamleh et al. (2020) e se mostrou adequado, orientando a tomada de decisões complexas. Malakahmad et al., (2014) também utilizaram SIG para otimização das rotas, reduzindo a extensão destas e o tempo de conclusão da coleta dos resíduos sólidos. Desse modo, essas pesquisas corroboraram para este estudo, confirmando a adequação do uso de SIG, em especial o uso do *software* ArcGIS, para a roteirização da coleta de resíduos sólidos, podendo ser estendido à coleta seletiva.

Figura 4 – Rota I: Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) para a coleta seletiva.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 5 – Rota II: Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) para a coleta seletiva.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Direções de tráfego

O arquivo *Directions* foi gerado como complemento de resultados finais e funcionou como importante ferramenta de localização e orientação em cada parte da rota, distâncias detalhadas entre vias e PEVs e do percurso total e o tempo gasto para atender a coleta seletiva.

A distância total para a Rota I foi de 23 quilômetros com um tempo gasto de 39 minutos (Figura 6) e para a Rota II foi de 21 quilômetros em 37 minutos (Figura 7).

Figura 6 – Rota I: Distância total e tempo gasto no percurso.

Driving Directions		Page 1 of 3	
Route: Secretaria Municipal de Infraestrutura Serviços Urbanos e Rurais - Aterro Sanitario		23 km	39 min
1:	0 m 08:00	Start at Secretaria Municipal de Infraestrutura Serviços Urbanos e Rurais	
2:	0 m 08:00	13 m	< 1 min
3:	13 m 08:00	266 m	< 1 min
			• • •
		Page 3 of 3	
80:	20 km 08:35	46 m	< 1 min
81:	20 km 08:36	2,4 km	3 min
82:	23 km 08:39	Finish at Aterro Sanitario, on the right	
	23 km 08:39	Total time: 39 min Total distance: 23 km Start time: 10/06/2021 08:00 Finish time: 10/06/2021 08:39	

Fonte: autores.

Figura 7 – Rota II: Distância total e tempo gasto no percurso.

Driving Directions		Page 1 of 3	
Route: Secretaria Municipal de Infraestrutura Serviços Urbanos e Rurais - Aterro Sanitario		21 km	37 min
1:	0 m 08:00	Start at Secretaria Municipal de Infraestrutura Serviços Urbanos e Rurais	
2:	0 m 08:00	13 m	< 1 min
3:	13 m 08:00	82 m	< 1 min
4:	95 m 08:00	219 m	< 1 min
5:	314 m 08:01	383 m	< 1 min
6:	698 m 08:01	233 m	< 1 min
			• • •
		Page 3 of 3	
83:	21 km 08:37	Depart PEV_15	
84:	21 km 08:37	25 m	< 1 min
85:	21 km 08:37	156 m	< 1 min
86:	21 km 08:37	Finish at Aterro Sanitario, on the right	
	21 km 08:37	Total time: 37 min Total distance: 21 km Start time: 10/06/2021 08:00 Finish time: 10/06/2021 08:37	

Fonte: autores.

Os pontos de partida e despejo são a Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos e Rurais e o Aterro Sanitário, respectivamente. Além disso, observa-se que o aterro sanitário está a uma distância próxima ao PEV 15, último ponto de coleta da Rota II, diminuindo, assim, a distância do último ponto de coleta ao ponto de despejo e conseqüentemente redução de custo. Com duas rotas, Rota I e Rota II, o município pode desenvolver o planejamento da coleta seletiva, com menor distância, menor tempo de viagem, menor custo e compreendendo a maioria dos bairros, de modo que cada rota seja atendida pelo caminhão de coleta em dois dias da semana e que os resíduos sólidos recicláveis fiquem menos tempo armazenados nos domicílios. Para um desempenho satisfatório da coleta seletiva no município, a participação da população é fundamental.

Conclusão

Contribuições

- O presente estudo permitiu de maneira eficiente identificar e realizar a roteirização da coleta seletiva do município de Monte Carmelo – MG e os *softwares* utilizados (QGIS 3.16.5 e ArcGIS 10.0) foram imprescindíveis para sua conclusão. Foram geradas a Rota I e a Rota II, para que a coleta seletiva possa ser realizada em dois dias da semana para cada rota e atenda a maioria dos bairros do município. O sucesso da coleta seletiva também está relacionado à participação da população, a qual deve ser conscientizada com frequência sobre a importância da separação dos resíduos sólidos recicláveis em seus domicílios.
- Com a roteirização da coleta seletiva realizada, pode-se, a partir da execução do trajeto das rotas, utilizando-se o caminhão de coleta, calcular o custo mensal com combustível por trajeto percorrido das rotas e emissão de carbono.
- As ferramentas ligadas ao uso de SIG trazem benefícios indiscutíveis, quando consideradas as vantagens econômicas ao município e conseqüentemente a sociedade é também beneficiada. Algoritmos específicos, como *Network Analyst*, são desenvolvidos especificamente para roteamentos e a precisão computacional na criação de rotas não pode ser comparada à uma escolha de rota empírica.
- A representação da rede e a identificação dos PEVs possibilitaram visualizar a amplitude e condições reais onde ocorre o deslocamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos recicláveis. Os pontos definidos previamente foram atendidos, obedecendo às restrições e particularidades da malha viária de Monte Carmelo - MG.

Recomendações

- Pontos de entrega voluntária (PEVs) adicionais, compreendendo todos os bairros, principalmente os que não possuem coleta seletiva, tornam-se necessários. Espera-se que todos os bairros sejam atendidos com um PEV, facilitando, assim, o descarte voluntário de resíduos sólidos recicláveis pela população cada vez mais.
- Os *softwares* ligados aos SIGs são ferramentas computacionais poderosas e podem ser usados para a implementação de pontos distribuídos de forma equidistante relacionando-os com a quantidade de resíduos sólidos produzidos por bairro, este uma recomendação de estudo proveitoso e de grande contribuição social.

Referências

- ABOUSAEIDI, M., FAUZI, R., & MUHAMAD, R. (2016). Geographic Information System (GIS) modeling approach to determine the fastest delivery routes. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(5), 555-564. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.06.004>
- ASSAD, A. A. (1988). Modeling and implementation issues in vehicle routing. In L. B. Golden, & A. A. Assad (Eds), *Vehicle Routing: Methods and Studies* (p. 7-46). North Holland, Amsterdam.
- BERNARDO, M., & LIMA, R. S. (2017). Planejamento e implantação de um programa de coleta seletiva: utilização de um sistema de informação geográfica na elaboração das rotas. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 9, 385-395. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.009.SUPL1.AO10>
- BORTOLI, M. A. (2013). Processos de organização de catadores de materiais recicláveis: lutas e conformações. *Revista Katálysis*, 16(2), 248-257. <https://doi.org/10.1590/S1414-49802013000200011>
- BRASIL. (1997, 23 de setembro). Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF. Recuperado em 06 de abril de 2021, de http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503/compilado.htm
- BRASIL. (2010, 2 de agosto). 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. Presidência da República, Casa Civil, Brasília, DF. Recuperado em 18 de janeiro de 2021, de http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm

BRASIL. (2020). Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019*. Brasília: SNS/MDR. Recuperado em 06 de agosto de 2021, de <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2019>

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Série Histórica. *Resíduos Sólidos*. Recuperado em 09 de agosto de 2021, de <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>

CÂMARA, G., & MEDEIROS, J. S. (1998). In E. Assad, & E. E. Sano (org.). *Sistemas de Informações Geográficas, Aplicações na Agricultura*. Brasília: EMBRAPA – SPI.

CÂMARA, G., DAVIS, C., & MONTEIRO, A. M. V. (2001). *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE.

CHALKIAS, C., & LASARIDI, K. (2009). A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: the case study of Nikea, Athens, Greece. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(10), 640–650.

DOTOLI, M. EPICOCO, N. (2017). A Vehicle Routing Technique for Hazardous Waste Collection. *IFAC PapersOnLine*, 50(1), 9694–9699. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2051>

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. (2011). *Geographic information systems and environmental health: Incorporating Esri Technology and Services*. New York: ESRI.

GHOSE, M. K., DIKSHIT, A. K., & SHARMA, S. K. (2006). A GIS based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality. *Waste Management*, 26(11), 1287–1293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.022>

GUIMARÃES, B., SIMÕES, P., MARQUES, R. C. (2010). Does performance evaluation help public managers? A Balanced Scorecard approach in urban waste services. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2632-2638. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.039>

HANNAN, M. A., BEGUM, R. A., AL-SHETWI, ALI Q., KER, P. J., AL MAMUN, M. A., AINI HUSSAIN, HASSAN BASRI, MAHLIA, T. M. I. (2020). Waste collection route optimisation model for linking cost saving and emission reduction to achieve sustainable

- development goals. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102393.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102393>
- HATAMLEH, R. I., JAMHAWI, M. M., AL-KOFAHI, S. D., HIJAZI, H. (2020). The Use of a GIS System as a Decision Support Tool for Municipal Solid Waste Management Planning: The Case Study of Al Nuzha District, Irbid, Jordan. *Procedia Manufacturing*, 44, 189–196.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.221>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2011). *Sinopse do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2017). *Geociências*. Recuperado em 06 de abril de 2021, de <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2021). *Panorama Cidades: Monte Carmelo, MG*. Recuperado em 30 de agosto de 2021, de <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/monte-carmelo/panorama>
- KALLEL, A., SERBAJI, M. M., & ZAIRI, M. (2016). Using GIS-Based Tools for the Optimization of Solid Waste Collection and Transport: Case Study of Sfax City, Tunisia. *Journal of Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4596849>
- MALAKAHMAD, A., BAKRI, P. MD, MOKHTAR, M. R. MD, KHALIL, N. (2014). Solid waste collection routes optimization via GIS techniques in Ipoh city, Malaysia. *Procedia Engineering*, 77, 20–27. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.023>
- NITHYA, R., VELUMANI, A., & SENTHIL KUMAR, S. R. R. (2012). Optimal location and proximity distance of municipal solid waste collection bin using GIS: a case study of Coimbatore City. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 8(4), 107-119.
- OLIVEIRA, R. L. (2011). *Logística reversa: a utilização e um sistema de informações geográficas na coleta seletiva de materiais recicláveis* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- PASCOAL JÚNIOR, A., & OLIVEIRA FILHO, P. C. (2010). Análise de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares com uso de geoprocessamento. *Revista Acadêmica: Ciências Agrárias Ambientais*, 8(2), 131-144. <http://dx.doi.org/10.7213/cienciaanimal.v8i2.10808>
- PAULA, M. A. A. F. (2009). *Estudo de roteirização de veículos empregando o TransCAD: contribuição para a distribuição urbana de cargas* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia.

- PEIXOTO, K., CAMPOS, V. B. G., & D'AGOSTO, M. A. (2006). Localização de Equipamentos para Coleta Seletiva de Lixo Reciclável em Área Urbana. In *Anais do 2º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento, Urbano, Regional, Integrado, Sustentável*. Braga: PLURIS.
- POTDAR, A., SINGH, A., UNNNIKRISHNAN, S., NAIK, N., NAIK, M., NIMKAR, I. (2016). Innovation in solid waste management through Clean Development Mechanism in India and other countries. *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.009>
- RAI, R. K., BHATTARAI, D., NEUPANE, S. (2019). Designing solid waste collection strategy in small municipalities of developing countries using choice experiment. *Journal of Urban Management*, 8, 386-395. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2018.12.008>
- RODRIGUES, W., & SANTANA, W. C. (2012). Análise econômica de sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos: o caso da coleta de lixo seletiva em Palmas, TO. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 4(2), 299-312. <https://doi.org/10.7213/urbe.7402>
- SANTAELLA, S. T. (2014). *Resíduos sólidos e a atual política ambiental brasileira*. Fortaleza: UFC/LABOMAR/NAVE.
- SINGH, A. (2019). Remote sensing and GIS applications for municipal waste management. *Journal of Environmental Management*, 243, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.017>
- TEODOROVIC, D. (1986). *Transportation Networks: a quantitative treatment*. University of Belgrade, Gordon and Breasch Science Publishers S.A., Belgrade, Serbia.