

Artigo Técnico

Otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos no Estado do Paraná: repensando a localização de aterros sanitários com base em modelagem matemática

Optimization of municipal solid waste transportation in the State of Paraná: rethinking the location of landfills based on mathematical modeling

David Gabriel de Barros Franco^{1*} , Maria Teresinha Arns Steiner² 

RESUMO

Neste trabalho foram utilizados, conjuntamente, os conceitos de particionamento territorial e localização de instalações para a otimização da rede de aterros sanitários do Estado do Paraná. Isso porque a solução adotada atualmente apresenta uma série de deficiências, incluindo o não atendimento total da demanda, o número excessivo de pequenos locais e diversos consórcios não contíguos, que resultam em maiores custos de transporte e menor eficiência de escala. O objetivo desta pesquisa é otimizar o particionamento territorial para o Estado do Paraná com relação aos aterros sanitários definindo um número adequado de lugares capaz de atender à demanda e que minimize as distâncias a serem percorridas dos pontos de geração do lixo até o descarte. Para isso, foram desenvolvidas simulações em função do custo de transporte rodoviário dos resíduos, em que foram considerados os locais dos 171 aterros operacionais existentes no Estado. Os resultados mostraram a necessidade de se alterarem algumas das capacidades das áreas de descarte existentes, além de se adicionarem 25 novas áreas para atender integralmente à demanda. Com isso, o gasto com transporte seria reduzido em cerca de 80% e o custo total, que inclui novas construções, ficaria reduzido em 57%, acarretando redução de gastos, além do aprimoramento na prestação do serviço e da atenuação do impacto ambiental.

Palavras-chave: gestão de resíduos sólidos urbanos; problema de localização de facilidades; particionamento territorial; pesquisa operacional.

ABSTRACT

In this work, the concepts of territorial partitioning and location of facilities were used together to optimize the landfill network in the state of Paraná. The solution currently adopted has a series of shortcomings, including not fully meeting the demand, an excessive number of small landfills and several non-contiguous consortia, resulting in higher transportation costs and lower scale efficiency. The objective of this research is to optimize the territorial partitioning for the state of Paraná in relation to landfills by defining an adequate number of landfills capable of meeting the demand and also minimizing the distances to be traveled from the waste generation points to the landfills. For this, several scenarios were developed based on the cost of road transportation of waste, in which the locations of the 171 operational landfills already existing in the state were considered. The results showed the need to change some of the capacities of the existing landfills, in addition to adding 25 new landfills to fully meet the demand. With this, transportation costs would be reduced by about 80% and the total cost, which includes the cost of construction, would be reduced by approximately 57%, resulting in cost reduction, in addition to improving service provision and mitigating environmental impact.

Keywords: municipal solid waste management; facility location problem; territorial partitioning; operational research.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a urbanização e o desenvolvimento econômico são fatores que levam a maior geração de resíduos. A crescente prosperidade dos países, medida como o crescimento do produto interno bruto (PIB) *per*

capita, e a migração urbana constante têm aumentado a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) (BROWN, 2015; KAZA *et al.*, 2018). Essa mudança na estrutura social dificulta a oferta de serviços adequados de coleta e tratamento de lixo.

¹Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital -Palmas (TO), Brasil.

²Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - Curitiba (PR), Brasil.

*Autor correspondente: david.franco@uft.edu.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Recebido: 27/10/2021 - **Aceito:** 02/05/2022 - **Reg. ABES:** 20210282

De acordo com relatório do Banco Mundial, 3,4 bilhões de toneladas de RSU serão gerados em todo o mundo até 2050, em comparação com os 2 bilhões produzidos em 2018 (aumento de 70%), dos quais apenas 13,5% são reciclados e 5,5% compostados (KAZA *et al.*, 2018). O relatório estima que, em vez de serem gerenciados de forma adequada, entre 30 e 40% dos resíduos gerados em todo o mundo são queimados ou descartados abertamente.

No Brasil, foram produzidos 79 milhões de toneladas de RSU em 2019 (aumento de 19,7% em relação a 2010), dos quais 91% foram coletados (aumento de 24,2% em relação a 2010). Isso mostra que a coleta aumentou a uma taxa maior que a da geração de resíduos. Mesmo assim, 6,3 milhões de toneladas de resíduos permaneceram sem coleta. Apenas 59,5% dos RSU coletados foram destinados a aterros sanitários, sendo o restante descartado em locais inadequados (23% em aterros controlados e 17,5% em lixões). Ou seja, 29,2 milhões de toneladas de RSU acabaram indo para lixões ou áreas que não possuem um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas ou o meio ambiente de danos e degradação (ABRELPE, 2020; PENTEADO; CASTRO, 2021).

Outro aspecto importante da gestão de RSU é o transporte, que também é responsável por emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂) (TAŞKIN; DEMIR, 2020). No Brasil, a principal fonte de emissões do setor de energia é o transporte: em 2018 foi responsável por 200,2 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e), ou 49% do total (ANGELO; RITTL, 2019). O transporte de cargas continua sendo um segmento de alto nível de emissões e mais difícil de manejar dado o predomínio do transporte rodoviário no País, uma vez que 61,1% da carga é transportada por rodovias no Brasil (BETARELLI JR.; DOMINGUES; HEWINGS, 2020). Os caminhões, principal fonte das emissões, lançaram 82,6 milhões de toneladas de CO₂e na atmosfera em 2018, ou seja, 69,6% a mais do que todas as termelétricas em operação no Brasil, que, juntas, emitiram 48,7 milhões de toneladas de CO₂e (ANGELO; RITTL, 2019).

O particionamento territorial objetiva dividir o espaço geográfico de acordo com algum critério específico, visando, entre outras coisas, alcançar a alocação racional de recursos limitados (KIM; WIGGINS; WRIGHT, 1990; DUQUE; CHURCH; MIDDLETON, 2011; DUQUE; ANSELIN; REY, 2012). Entre suas várias aplicações, podemos citar a localização de instalações públicas (TEIXEIRA; ANTUNES, 2008), a alocação de unidades espaciais para formar regiões contíguas de acordo com um critério específico (SHIRABE, 2005; 2009), o desenho de distritos eleitorais (MEHROTRA; JOHNSON; NEMHAUSER, 1998), a modelagem de regiões contíguas (COVA; CHURCH, 2000), o desenho de território para o agrupamento de recursos energéticos (YANIK; SÜRER; ÖZTAYŞI, 2016), a localização de tribunais de justiça (TEIXEIRA *et al.*, 2019), a localização de serviços urbanos (FARAHANI *et al.*, 2019) e a agregação espacial de áreas censitárias (DATTA; MALCZEWSKI; FIGUEIRA, 2012).

Muitos estudos têm tratado separadamente dos problemas de localização de instalações e de particionamento territorial. Desse modo, o presente trabalho visa unir esses dois campos de análise e propor uma nova metodologia de particionamento territorial contíguo e localização de aterros sanitários, minimizando o deslocamento dos caminhões de transporte dos RSU, assim como o custo das instalações sanitárias, em função das economias de escala. Os resultados desta pesquisa poderão ser utilizados por tomadores de decisão na concepção de sistemas de gestão de RSU, levando em consideração os aspectos econômico e ambiental.

As principais contribuições do artigo são: a formulação de um modelo matemático que visa otimizar a localização do sistema sanitário paranaense de destinação de resíduos sólidos, equacionando os gastos com transporte e construção; a utilização dos centroides como referência na tarefa de geração de regiões contíguas; a elaboração de equações para estimar o gasto com infraestrutura sanitária, para o caso brasileiro, por meio de análise de regressão com dados disponíveis na literatura; e a produção de um modelo que auxilie gestores públicos a tomar melhores decisões no que diz respeito ao gerenciamento de RSU.

REFERENCIAL TEÓRICO

Muitos são os trabalhos relacionados à sustentabilidade e ao particionamento territorial, campo do presente estudo. Na revisão de literatura, cuja busca foi realizada na base Scopus, foi considerada uma combinação de três termos de pesquisa: *sustainability*, o tema central deste trabalho, e uma combinação dos termos *clustering* e *territorial partitioning*. Quanto aos filtros iniciais, foram selecionados apenas artigos de periódicos e conferências escritos em inglês. Na filtragem seguinte, foram mantidos os artigos relacionados ao tema da prevenção do esgotamento dos recursos naturais, e, por fim, foram analisados os 39 artigos mais recentes para a identificação das metodologias aplicadas.

Três dos 39 trabalhos descritos e analisados utilizaram modelagem matemática, assim como a proposta desta pesquisa: Jing *et al.* (2019) adotaram técnicas que incluíam a programação linear inteira mista (PLIM) para a modelagem de sistemas de energia; Lahoorpoor *et al.* (2019) empregaram programação linear inteira (PLI) para o problema de compartilhamento de bicicletas; e Nicoletti e You (2020) usaram programação linear inteira mista binária (PLIMB) para analisar a otimização multiobjetivo ambiental. Em nenhum dos artigos selecionados foi identificado o uso de um modelo de programação linear inteira binária (PLIB).

O problema de localização de facilidades (PLF) modela sistemas de localização de instalações produtivas ou de prestação de serviços. Esse modelo pode ser formulado, de modo exato, como um PLIB, por meio do problema das *p*-medianas (PPM). O PPM consiste em determinar a localização de *P* instalações e atribuir-lhes usuários com o objetivo de minimizar a distância total percorrida da origem até as instalações (GALVÃO, 2004). A formulação clássica do PPM é fornecida a seguir, nas Equações 1 a 6 (LAPORTE, 2019).

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_j c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (6)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total de transporte C_{ij} de atribuir a demanda dos clientes *j* às instalações *i*. As restrições em (2) garantem que a demanda de cada cliente *j* será atendida por apenas uma instalação (já que as variáveis x_{ij} são binárias). As restrições (3) garantem que cada cliente *j* será

designado para uma instalação i apenas se ela estiver operacional. Por fim, as restrições em (4) limitam o número de instalações a serem abertas, enquanto as restrições (5) e (6) definem o domínio das variáveis de decisão como binário.

Atualmente, 174 consórcios atendem ao Estado do Paraná, ou seja, 174 aglomerados de municípios que utilizam os mesmos destinos para os resíduos, do total de 399 municípios (171 ativos no Estado e três localizados no Estado vizinho, Santa Catarina). Assim, em média, são 2,3 municípios consorciados para compartilhar o mesmo destino. Para otimizar essa configuração como um todo, podem-se aplicar os conceitos do PLF para determinar a melhor configuração para consórcios de lixo.

A configuração atual usada no Estado não é a ideal, deixando 64 cidades (16% do total) excluídas do sistema de destinação correta dos resíduos. Além disso, utiliza um número excessivamente grande de aterros (174), a maioria de pequeno porte (capacidade média de 50 toneladas diárias). Ainda, alguns dos consórcios não são contíguos e outros não respeitam as restrições apresentadas nas Equações 2 e 5 do PPM. Por fim, 17 localidades paranaenses são atendidas por três aterros sanitários no Estado de Santa Catarina, localizados em Chapecó, Rio Negrinho e Mafra.

A distância média percorrida entre as 17 localidades paranaenses atendidas por Santa Catarina até os destinos é de aproximadamente 182 km, chegando a 396 km para Altamira do Paraná, a qual encaminha seu RSU para Chapecó. Assim, os 174 consórcios atendem a 335 cidades do total de 399, e 64 não são atendidas, as quais produzem cerca de 850 toneladas de resíduos por dia.

Na configuração atual do sistema de destinação de resíduos do Estado, 147 consórcios atendem a apenas um único cliente, 24 atendem entre dois e nove clientes e apenas três consórcios atendem a mais de dez clientes (Tabela 1). No cenário atual, o elevado número de pequenas áreas de disposição de resíduos acarreta, proporcionalmente, maior custo de infraestrutura, em consequência do efeito de economias de escala. Enquanto isso, como muitos consórcios são geograficamente descontínuos, a distância total percorrida para o transporte de resíduos aumenta.

A duração de todo o ciclo de vida de um aterro é em torno de 42 anos (FGV, 2009; SCARLAT *et al.*, 2015). A fase de pré-implantação ocupa o primeiro ano. No segundo ano, ocorre a fase de implantação. Geralmente, no caso

do Brasil, os aterros sanitários operam em torno de 20 anos, do terceiro ao 22º ano, independentemente de seu tamanho (FGV, 2009). Por fim, do 23º ao 42º ano, temos as fases de encerramento e pós-encerramento, durante as quais a área é monitorada.

METODOLOGIA

Para se atingir o objetivo, foi proposta uma metodologia em cinco etapas: seleção dos dados, processamento, transformação, modelagem matemática e avaliação dos resultados. Na etapa de seleção, os dados foram coletados em duas bases de dados governamentais e selecionados para utilização no modelo matemático proposto. O processamento envolveu a busca dos centroides dos municípios e a transformação calculou a distância de Haversine (distância entre dois pontos na superfície de uma esfera conforme suas latitudes e longitudes) entre eles. Na quarta etapa, modelagem matemática, foi implementado o PPM e, por fim, os resultados foram analisados. A Figura 1 apresenta as etapas da metodologia.

Os dados das regiões urbanas foram extraídos do banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), incluindo as coordenadas geográficas de cada localidade. As informações sobre a produção de RSU foram obtidas no banco de dados da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA-PR). A distância rodoviária entre cada cidade foi consultada com o *Google Distance Matrix API*.

Inicialmente, foram identificados os centroides de cada um dos 399 municípios do Estado do Paraná. Com base nesses centroides, foi possível calcular a distância de Haversine entre todos eles, de acordo com a Equação 7.

$$H = 2r \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \quad (7)$$

Em que:

φ_1 e φ_2 = latitude dos pontos 1 e 2, em radianos;

λ_1 e λ_2 = longitude dos pontos 1 e 2, também em radianos.

O raio da Terra, de 6,371 km, é representado por r . O valor de H é dado em quilômetros.

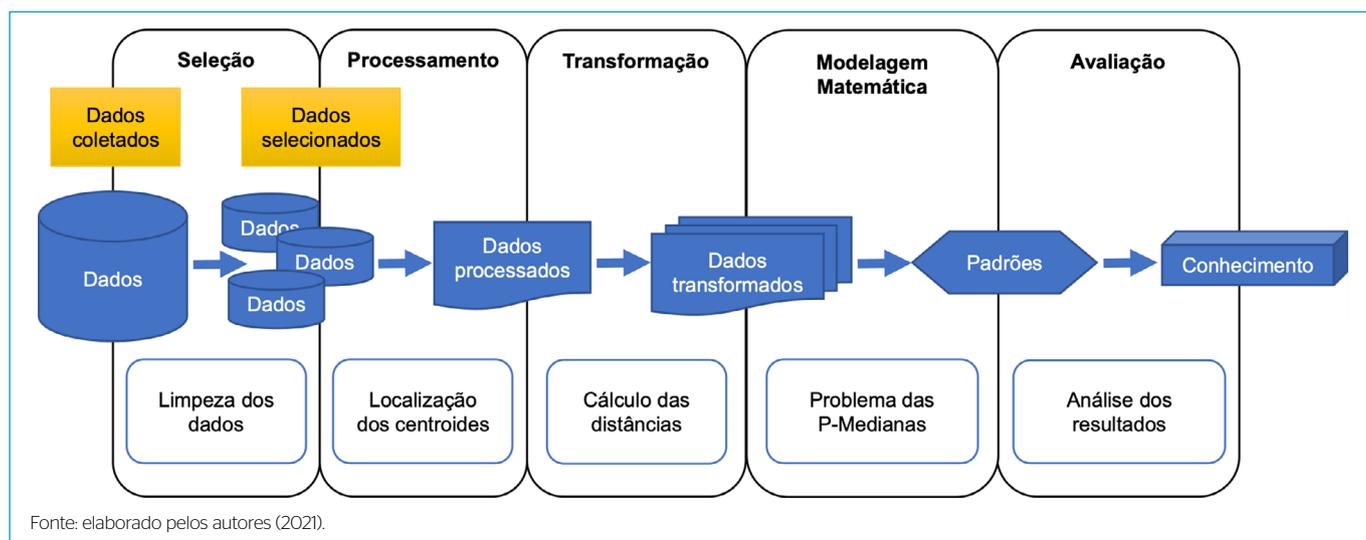


Figura 1 - Metodologia proposta.

A distância de Haversine entre os centroides foi utilizada com o objetivo de encontrar grupos contíguos, eliminando restrições impostas a este tipo de problema (STEINER NETO *et al.*, 2017). Para definir o número ótimo de consórcios, foi utilizada a menor distância rodoviária entre cada cidade. Como 89% do território paranaense apresenta declividade inferior a 20%, essa variável não foi considerada no modelo matemático (HÖFIG; ARAUJO-JUNIOR, 2015; GONÇALVES; VIZINTIM, 2017).

Com a matriz de distâncias resultante (399 × 399 localidades), foi possível formular o problema de particionamento territorial como um PPM, em que, na Equação 1, C_{ij} se torna a distância de Haversine entre as cidades i e j (H_{ij}), ponderada pelo RSU gerado em cada localidades, como mostrado na Equação 8. As restrições permanecem as mesmas.

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} RSU_j H_{ij} x_{ij} \tag{8}$$

Na simulação foram considerados os aterros existentes e os novos, propostos para atender a toda a demanda do Estado, incluindo o resíduo que não é descartado corretamente. Os testes envolveram dez cenários, em termos do número P de aterros a serem construídos: $P \in \{10, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 40, 50\}$. Esses dez cenários foram escolhidos porque testes preliminares indicaram convergência para menor custo total no intervalo [10,50]. Para cada hipótese, a solução ótima foi identificada resolvendo-se o PPM e calculando-se o respectivo gasto com infraestrutura. O melhor cenário foi aquele que apresentou equilíbrio entre custos fixos (infraestrutura) e variáveis (transporte). Nos testes, foram levados em consideração os custos de expansão das áreas existentes, caso a demanda excedesse a capacidade instalada.

Com base nos valores de construção da infraestrutura sanitária obtidos na literatura (FGV, 2009) e atualizados de acordo com o Índice Nacional de Custo de Construção — Mercado (INCC-M), foi realizada a análise de regressão que resultou nas Equações 9 e 10, de custo de construção total e custo de construção por tonelada diária, respectivamente.

$$c_{total} = -3,0431x^2 + 27.366,9961x + 4.183.512,4521 \quad R^2 = 1,0000 \tag{9}$$

$$c_{ton} = 368.136,5187x^{-0,3671} \quad R^2 = 0,9943 \tag{10}$$

A Equação 9, melhor ajustada por regressão polinomial de segunda ordem, foi então usada para calcular o gasto fixo para cada cenário, uma vez que há desaceleração no aumento do custo de construção (sinal negativo no termo quadrático), implicando economias de escala para o custo total da obra. O valor de construção por tonelada foi melhor ajustado por regressão potencial, de acordo com a Equação 10. Percebe-se que, em razão das economias de escala, as áreas com maior capacidade são exponencialmente mais baratas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cenários foram simulados utilizando o *software* LINGO 18.0 (*Language for Interactive General Optimizer*) em um computador com processador Intel i7-2600k, com 16 GB de RAM. Levando em consideração o gasto com transporte e construção para os dez cenários, chegamos à seguinte conclusão: conforme o número de aterros aumenta, o custo variável diminui e o fixo aumenta. A análise, com valores normalizados, está resumida na Figura 2.

O cenário ótimo, em que a diferença entre custos fixos e variáveis é zero, é o que acrescenta 25 novos aterros ao sistema, chegando ao total de 196 em todo o Estado. A Figura 3 apresenta esta solução para $P = 196$ medianas (171 existentes e 25 novas). Os valores normalizados são necessários para se obter a intersecção dos custos (*trade-off*), uma vez que as escalas são diferentes para gastos fixos e variáveis (STEINER NETO *et al.*, 2017; FRANCO; STEINER; ASSEF, 2021).

Além do acréscimo de 25 novas áreas de destinação de resíduos, a configuração dos consórcios foi alterada, ou seja, a definição de qual espaço atenderá a qual cidade. Nessa nova configuração, todas as cidades são atendidas por consórcios localizados no Estado do Paraná, não havendo mais o problema de

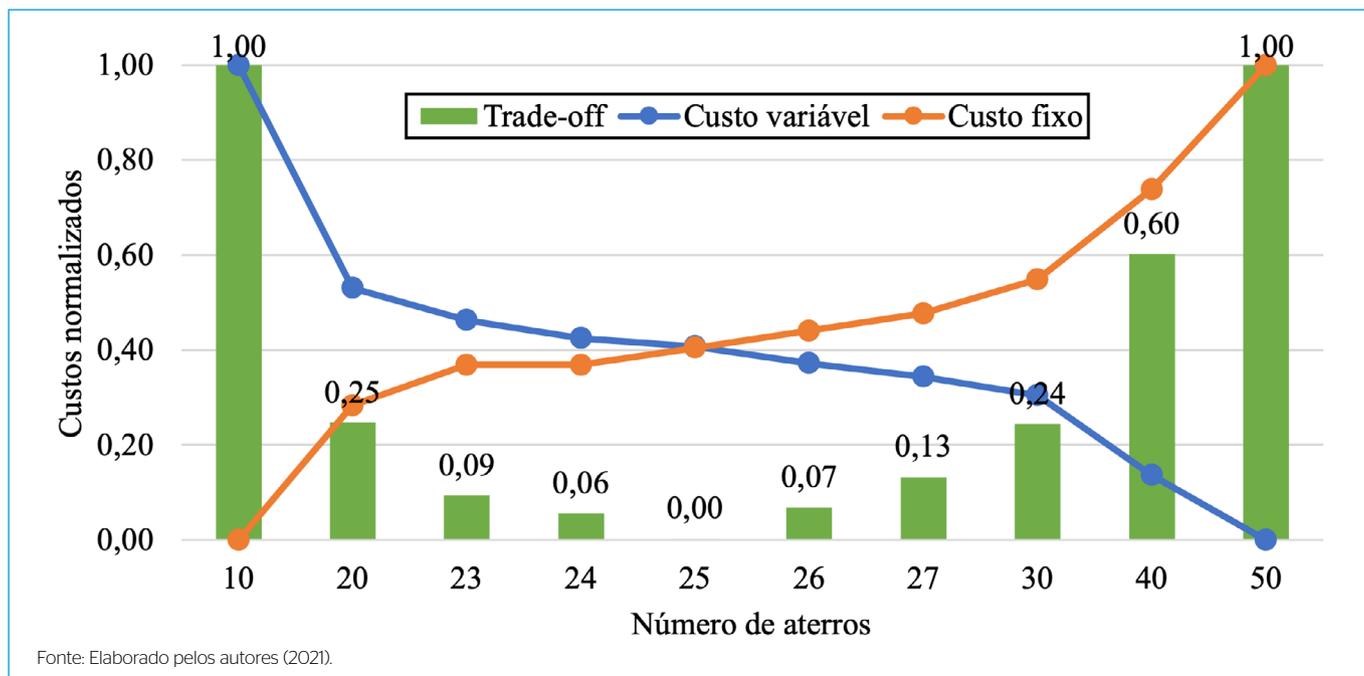


Figura 2 - Trade-off entre custos fixos e variáveis.

aglomerados dispersos (uma vez que a contiguidade dos consórcios foi preservada), o que os torna compactos e tem efeito positivo no custo de transporte. A Tabela 1 compara a situação atual e a solução proposta, em termos de número de consórcios que atendem a determinada quantidade de cidades.

Percebe-se melhor distribuição do número de clientes por consórcio em relação à situação atual. Por exemplo: os consórcios unitários diminuíram de 147 para 94, e os consórcios formados por dois clientes aumentaram de oito para 50, gerando maior aproveitamento das economias de escala em relação ao valor da construção.

Comparando-se os cenários, a solução proposta diminuiria o gasto com transporte em 80,25%, uma vez que a distância média percorrida se reduziria em 4,35%, consequência direta do maior número de áreas de atendimento. Mesmo em se considerando o incremento de 5,95% no valor da construção (estimado pela Equação 9), por causa dos 25 novos locais, a despesa total se reduziria em 56,76%, já que o gasto com transporte, ao longo da vida útil do consórcio, representa a maior parte dos valores aqui analisados (72,7%).

A Tabela 2 compara o cenário atual, com 171 aterros no Paraná e três em Santa Catarina, e o cenário otimizado (acréscimo de 25 novos aterros e reconfiguração dos consórcios).

Essa redução no valor do transporte deve-se, principalmente, à escolha otimizada dos clientes que integram cada consórcio. Ao contrário da situação atual, com aglomerados dispersos e longas distâncias a percorrer (incluindo o envio de RSU para outro Estado), na solução proposta os consórcios se tornam mais compactos e as distâncias são minimizadas.

Os testes realizados mostram a sensibilidade do modelo ao componente transporte, maior do que ao de infraestrutura, quando analisado todo o período de operação dos consórcios. A solução proposta apresenta resultados melhores que o cenário existente em função da configuração ótima das designações por meio do PPM. Deve-se notar que o gasto com infraestrutura dos dois cenários é relativamente semelhante em comparação com a grande diferença no transporte. Isso porque o valor de construção é calculado de acordo com a quantidade de resíduos depositados, que é igual para os dois cenários. O que

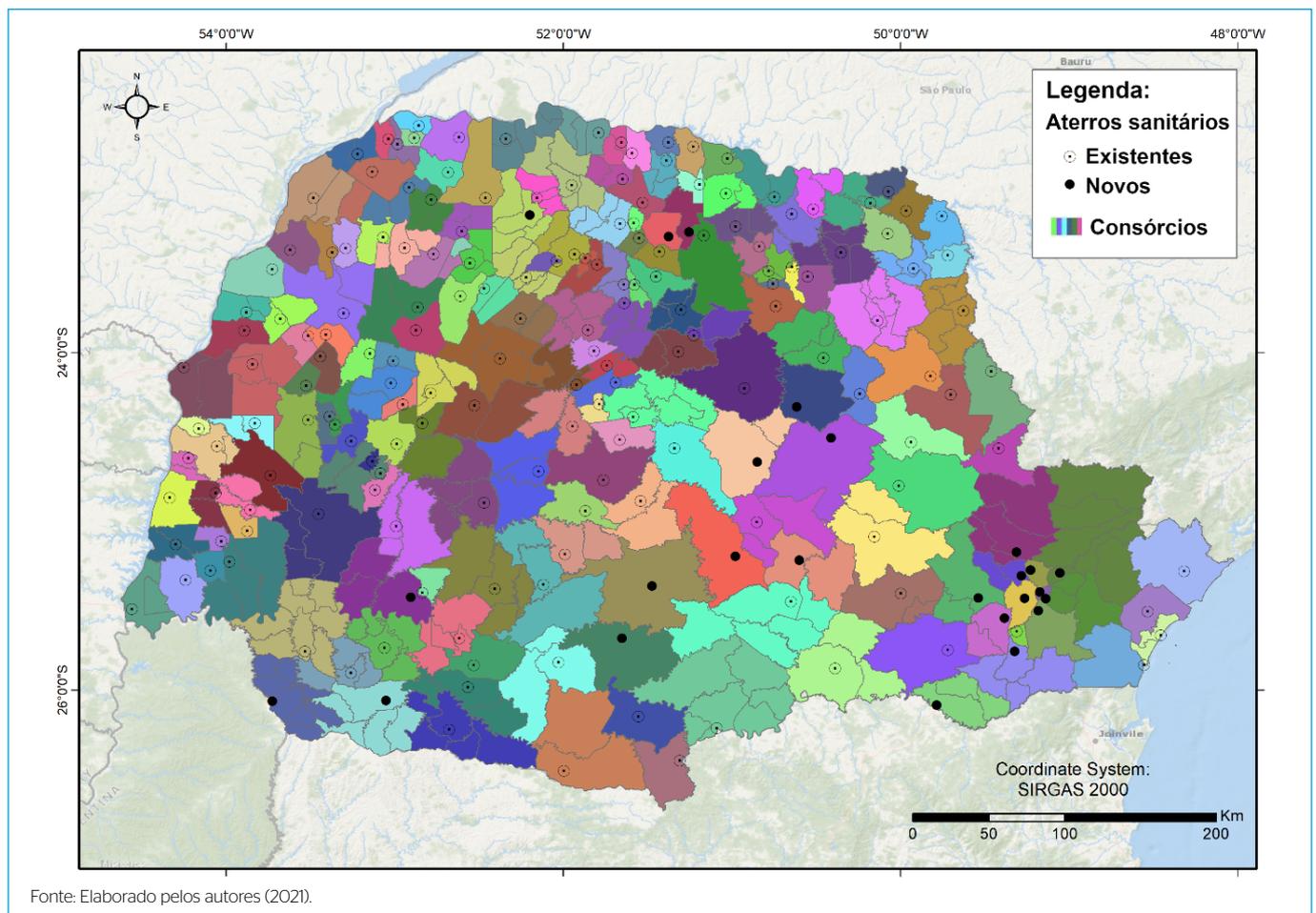


Figura 3 - Solução otimizada para o problema.

Tabela 1 - Número de consórcios em função do número de municípios atendidos.

Municípios atendidos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	14	22	42
Consórcios	Situação atual	147	8	2	3	3	2	2	1	3	1	1	1
	Solução proposta	94	50	26	11	11	2	-	2	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Tabela 2 - Comparação da solução atual com a solução proposta.

Variável	Situação atual	Solução proposta	Diferença (%)
Custo de transporte (diário; R\$)	196.812	38.877	-80,25
Custo de transporte (20 anos; R\$)	1.436.727.600	283.802.100	
Custo de construção (R\$)	538.175.849	570.173.051	5,95
Custo total (20 anos; R\$)	1.974.903.449	853.975.151	-56,76
Distância média (km)	46	44	-4,35

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

vai mudar é a economia de escala na configuração da infraestrutura (quanto maior a área de recepção dos resíduos, menor o custo por tonelada depositada, conforme a Equação 10).

CONCLUSÕES

A gestão de RSU ainda permanece um desafio para os países em desenvolvimento em virtude do aumento da produção de resíduos e dos altos custos associados a sua gestão. Diante desse desafio, o presente trabalho buscou melhorias para o descarte de RSU no Estado do Paraná, por meio da formulação e resolução exata de um problema de particionamento territorial com localização de instalações. O objetivo foi minimizar o custo de construção dos aterros, bem como o de transporte dos resíduos até sua destinação. Em primeiro lugar, foi analisada a situação atual do sistema de gestão de RSU, concluindo-se que atualmente há desperdício expressivo de recursos financeiros em decorrência do alto valor do transporte para consórcios mal localizados, que formam aglomerados distantes e mesmo fora do Estado.

As simulações foram conduzidas considerando-se os 171 aterros existentes no Paraná, objetivando otimizar a formação dos consórcios (designação de clientes a cada aterro operacional) e suprir a demanda não atendida. Esse modelo pode ser utilizado em qualquer região onde já exista um sistema de disposição de RSU em espaços adequados. A proposta inclui a criação de 25 novos centros

de recepção de resíduos, em localizações ideais, para atender a toda a demanda a um custo mínimo. Os resultados foram gasto extra de aproximadamente R\$ 32 milhões para infraestrutura e redução no valor do transporte da ordem de 80,25%, passando de R\$ 196.812 para R\$ 38.877 diários.

Pode-se concluir que, em regiões onde já existe um sistema de aterros sanitários, é possível fazer melhorias. Para os casos em que ainda não existem áreas operacionais, é possível otimizar sua localização, reduzindo os gastos de construção e de transporte de RSU. Os formuladores de políticas e urbanistas poderão utilizar esse modelo de otimização na tomada de decisões de melhoria dos sistemas de gestão de RSU e logística reversa, possibilitando melhorias no atendimento ao cidadão e redução do impacto ambiental.

Vale destacar que a principal contribuição do trabalho foi propor um modelo de particionamento territorial que não depende de restrições extras para manter agrupamentos contíguos. Isso foi possível com o uso da distância de Haversine entre cada cidade como variável de custo em um modelo PPM. O resultado não foi prejudicado pelo uso dessa métrica, uma vez que a análise do número ótimo de consórcios utilizou a distância rodoviária real entre cada cidade. Outra importante contribuição deste trabalho é a criação de uma nova ferramenta de modelagem capaz de impactar positivamente a preservação dos recursos ambientais por meio do correto descarte de RSU. Entre as diversas possibilidades de aplicação, temos a logística reversa de produtos específicos identificados na legislação, como embalagens de produtos químicos, óleos, lixo eletrônico e lixo hospitalar. Além disso, o novo modelo pode ser usado em qualquer problema de particionamento territorial que requiera contiguidade espacial.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Franco, D.G.B.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Escrita — Primeira Redação. Steiner, M.T.A.: Supervisão, Validação, Obtenção de Financiamento, Supervisão, Escrita — Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ANGELO, C.; RITTL, C. *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil*. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. São Paulo, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020*. São Paulo: ABRELPE, 2020.
- BETARELLI JR., A.A.; DOMINGUES, E.P.; HEWINGS, G.J.D. Transport policy, rail freight sector and market structure: The economic effects in Brazil. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 135, p. 1-23, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.018>
- BROWN, D.P. Garbage: how population, landmass, and development interact with culture in the production of waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 98, p. 41-54, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.012>
- COVA, T.J.; CHURCH, R.L. Contiguity constraints for single-region site search problems. *Geographical Analysis*, v. 32, n. 4, p. 306-329, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2000.tb00430.x>
- DATTA, D.; MALCZEWSKI, J.; FIGUEIRA, J.R. Spatial aggregation and compactness of census areas with a multiobjective genetic algorithm: a case study in Canada. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 39, n. 2, p. 376-392, 2012. <https://doi.org/10.1068/b38078>
- DUQUE, J.C.; ANSELIN, L.; REY, S.J. The Max-P-regions problem. *Journal of Regional Science*, v. 52, n. 3, p. 397-419, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2011.00743.x>
- DUQUE, J.C.; CHURCH, R.L.; MIDDLETON, R.S. The p-Regions Problem. *Geographical Analysis*, v. 43, n. 1, p. 104-126, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2010.00810.x>

- FARAHANI, R.Z.; FALLAH, S.; RUIZ, R.; HOSSEINI, S.; ASGARI, N. OR models in urban service facility location: A critical review of applications and future developments. *European Journal of Operational Research*, v. 276, n. 1, p. 1-27, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.036>
- FRANCO, D.G.B.; STEINER, M.T.A.; ASSEF, F.M. Optimization in waste landfilling partitioning in Paraná State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 283, 125353, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125353>
- FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). *Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários*. São Paulo: FGV, 2009.
- GALVÃO, R.D. Uncapacitated facility location problems: contributions. *Pesquisa Operacional*, v. 24, n. 1, p. 7-38, 2004. <https://doi.org/10.1590/s0101-74382004000100003>
- GONÇALVES, M.; VIZINTIM, M.F.B. Características geográficas do Estado do Paraná frente aos desastres naturais. *Confins*, n. 33, 2017. <https://doi.org/10.4000/confins.12669>
- HÓFIG, P.; ARAUJO-JUNIOR, C.F. Terrain slope classes and potential for mechanization to coffee plantation in the state of Paraná. *Coffee Science*, v. 10, n. 2, p. 195-203, 2015.
- JING, R.; WANG, M.; ZHANG, Z.; WANG, X.; LI, N.; SHAH, N.; ZHAO, Y. Distributed or centralized? Designing district-level urban energy systems by a hierarchical approach considering demand uncertainties. *Applied Energy*, v. 252, 113424, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113424>
- KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, D.C.: World Bank, 2018.
- KIM, T.J.; WIGGINS, L.L.; WRIGHT, J.R. *Expert Systems: applications to urban planning*. Nova York: Springer, 1990.
- LAHOORPOOR, B.; FAROQI, H.; SADEGHI-NIARAKI, A.; CHOI, S.M. Spatial cluster-based model for static rebalancing bike sharing problem. *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 11, 3205, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11113205>
- LAPORTE, G. *Location science*. Cham: Springer, 2019.
- MEHROTRA, A.; JOHNSON, E.L.; NEMHAUSER, G.L. An optimization based heuristic for political districting. *Management Science*, v. 44, n. 8, p. 1021-1166, 1998. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.8.1100>
- NICOLETTI, J.; YOU, F. Multiobjective economic and environmental optimization of global crude oil purchase and sale planning with noncooperative stakeholders. *Applied Energy*, v. 259, 114222, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114222>
- PENTEADO, C.S.G.; CASTRO, M.A.S. Covid-19 effects on municipal solid waste management: What can effectively be done in the Brazilian scenario? *Resources, Conservation and Recycling*, v. 164, 105152, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105152>
- SCARLAT, N.; MOTOLA, V.; DALLEMAND, J.F.; MONFORTI-FERRARIO, F.; MOFOR, L. Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 1269-1286, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>
- SHIRABE, T. A model of contiguity for spatial unit allocation. *Geographical Analysis*, v. 37, n. 1, p. 2-16, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2005.00605.x>
- SHIRABE, T. Districting modeling with exact contiguity constraints. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 36, n. 6, p. 1053-1066, 2009. <https://doi.org/10.1068/b34104>
- STEINER NETO, P.J.; DATTA, D.; ARNS STEINER, M.T.; CANGIOLIERI JÚNIOR, O.; FIGUEIRA, J.R.; DETRO, S.P.; SCARPIN, C.T. A multi-objective genetic algorithm based approach for location of grain silos in Paraná State of Brazil. *Computers & Industrial Engineering*, v. 111, p. 381-390, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.019>
- TAŞKIN, A.; DEMIR, N. Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*, v. 61, 102339, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102339>
- TEIXEIRA, J.C.; ANTUNES, A.P. A hierarchical location model for public facility planning. *European Journal of Operational Research*, v. 185, n. 1, p. 92-104, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.027>
- TEIXEIRA, J.C.; BIGOTTE, J.F.; REPOLHO, H.M.; ANTUNES, A.P. Location of courts of justice: the making of the new judiciary map of Portugal. *European Journal of Operational Research*, v. 272, n. 2, p. 608-620, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.029>
- YANIK, S.; SÜRER, Ö.; ÖZTAYŞI, B. Designing sustainable energy regions using genetic algorithms and location-allocation approach. *Energy*, v. 97, p. 161-172, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.116>