

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES A PARTIR DO ROTEAMENTO E IMPLANTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRANSBORDO E TRIAGEM: O CASO DE CARAPEBUS-RJ

Maíra Moraes Duarte¹; Conrado Vidotte Plaza²; Beatriz Rohden Becker³; Glaydston Mattos Ribeiro⁴

^{1,2,3} Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/Macaé, 1maiiramduarte@gmail.com, 2conradoplaza@macae.ufrj.br, 3beatrizrbecker@gmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia – COPPE, 4glaydston@pet.coppe.ufrj.br

RESUMO

A quantidade de resíduos gerados pelas atividades humanas, aliado à escassez de locais apropriados e longas distâncias para sua disposição final tem apresentado grandes desafios a serem enfrentados pelas administrações municipais e pela comunidade geradora de Resíduos Solidos Domiciliares (RSDs). Dada a importância do gerenciamento adequado dos RSDs, este trabalho tem como objetivo elaborar propostas para otimização do sistema de coleta de RSD do município de Carapebus - RJ, visando a redução da produção quilométrica e avaliar os benefícios decorrentes da implantação de uma Estação de Transferência de Resíduos Sólidos (ETRS) na logística da coleta. Para isso, utilizou-se de uma metodologia baseada em análise de cenários, assistido por um SIG-T (neste caso, o software Caliper TransCAD). A análise dos resultados dos dois cenários propostos, comparados ao sistema atual (Cenário 0), indicou redução na produção quilométrica semanal total de até 54%. Maiores reduções foram obtidas para o Cenário 2, que considerou a implantação de um sistema de coleta por Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) e uma ETRS. Espera-se que este estudo possa contribuir para a gestão dos RSDs no município e evidenciar a aplicabilidade de ferramentas computacionais para o planejamento logístico da coleta de resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos urbanos, Gerenciamento de resíduos sólidos, Roteamento para coleta de resíduos sólidos, Estação de Transferência de Resíduos Sólidos (ETRS)

ABSTRACT

The amount of generated waste by human activities, associated with the shortage of appropriated places and long distances for final disposal have presented as major challenges to be faced by municipal administrations and the generating community of Household Solid Waste (HSW). Given the importance of the adequate management of HSW, this work aims to develop proposals to optimize the HSW collection in the city of Carapebus - RJ, Brazil, aiming at reducing the kilometer production and the evaluation of the impacts from the Solid Waste Transfer Station (SWTS) implementation in the collection logistics. The methodology based on scenarios evaluation was used. The scenarios were assisted by a GIS-T (in this case, the software Caliper TransCAD). The results of the two proposed scenarios, compared to the current HSW collection system (Scenario 0), indicated a reduction of up to 54% in the weekly kilometer production. Greater reductions were obtained for Scenario 2, which considered both the implementation of a collection system based on Voluntary Delivery Points (VDPs) and one SWTS. It is expected that this study can contribute to the HSW management in the city and highlight the applicability of computational tools for the logistical planning of waste collection.

KEYWORDS: Urban solid waste, Solid waste management, Routing for solid waste collection, Solid Waste Transfer Station (SWTS)

DOI: 10.5380/2stpr2020.artcomp13p197-208



1. INTRODUÇÃO

Estima-se que a população mundial, hoje de 7,4 bilhões, gere entre 2 e 3 bilhões de toneladas de lixo por ano. No Brasil, em 2017, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) foi de 78,4 milhões de toneladas (ABRELPE, 2017). Uma vez que a maioria das cidades brasileiras não possui aterro sanitário próprio, é usual o transporte destes resíduos para áreas distantes das concentrações urbanas, até um destino ambientalmente correto. Isto se deve, dentre outros fatores, aos altos custos dos terrenos (já que necessita-se de grandes extensões), às exigências ambientais e à resistência da população em aceitar a implantação de aterros sanitários próximo de suas residências (MONTEIRO, 2001).

O crescimento populacional, o aumento na geração de resíduos pelas atividades humanas, a escassez de locais apropriados para o descarte de RSUs e o distanciamento cada vez maior destes em relação aos centros de geração e coleta têm proporcionado consequências significativas aos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos, apresentando grandes desafios a serem enfrentados pelas administrações públicas. Como exemplo, destaca-se o alto custo de transporte, proporcional aos longos trajetos percorridos até os aterros. Por conta disso, a Estação de Transferência de Resíduos Sólidos (ETRS) torna-se uma parte estratégica dos atuais sistemas de gestão municipal de resíduos sólidos (MEDEIROS, 2013). Com instalação próxima ao centro de massa de geração de resíduos, visam a transferência dos volumes coletados por caminhões de menor capacidade para caminhões maiores, reduzindo-se o número de viagens até os aterros. Essas Estações permitem, ainda, caso haja triagem, promover a separação adequada dos resíduos a serem destinados à reciclagem, reduzindo a quantidade de lixo enviada para o aterro sanitário. Assim, a implantação de uma ETRS pode trazer tanto ganhos ambientais (redução na emissão de CO₂ e aumento da vida útil de aterros sanitários) quanto econômicos (associados aos custos logísticos).

Dada a importância do gerenciamento adequado dos RSUs, este trabalho visa elaborar propostas para a otimização do sistema de coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) do município de Carapebus - RJ, visando a redução da produção quilométrica e avaliar os benefícios decorrentes da implantação de uma ETRS na logística da coleta.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

Philipp Jr e Aguiar (2005 apud PARAVIDINO e DOS SANTOS PINTO, 2017) afirmam que a urbanização brasileira foi conduzida sem infraestrutura adequada e carente de melhorias dos serviços públicos disponíveis para atender as crescentes demandas populacionais. Como resultado, verificou-se o agravamento de problemas socioambientais, disseminação de doenças e a necessidade de um novo olhar para a gestão de determinados serviços, como o gerenciamento de resíduos sólidos. Estes, conhecidos vulgarmente por "lixo", podem ser constituídos de uma mistura de resíduos produzidos nas residências, comércio e serviços e nas atividades públicas (BRAGA *et al.*, 2005).

O gerenciamento dos RSUs, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela Lei 12.305/2010, é definido como o conjunto de ações exercidas nas etapas de coleta, transporte, transferência, tratamento, destinação dinal e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos gerados na cidade. Tais etapas tornaram-se um desafio aos responsáveis pelas tomadas de decisão devido, na maioria das vezes, à falta de recursos financeiros e humanos. A coleta e transporte são as etapas mais importantes, pois correspondem de 50% a 80% dos custos, devendo ser planejadas para não gerar gastos excedentes (BRASILEIRO e LACERDA, 2008).

A gestão dos RSUs deve garantir a universalização dos serviços prestados e regularidade das coletas, sejam eles domiciliares, de feiras livres, de calçadas ou estabelecimentos públicos (FUNASA, 2004). As estratégias de coleta mais utilizadas no Brasil são: porta-a-porta, no qual o veículo percorre a extensão total das vias, coletando os resíduos sólidos domiciliares (RSD) previamente depositados em frente aos domicílios e estabelecimentos comerciais e; Pontos de Entrega Voluntária (PEV), que consiste na colocação de caçambas, *conteiners* ou um conjunto de lixeiras (que podem se diferenciar por cores) em locais públicos estratégicos para que seja feito o descarte dos resíduos.

Depois de coletados, os resíduos são encaminhados para a disposição final. O destino mais utilizado no Brasil e ambientalmente correto é o aterro sanitário. No entanto, a falta de grandes áreas em locais próximos aos centros urbanos que atendam as exigências de construção de aterro sanitário e o crescente aumento na geração de resíduos faz com que seja necessário percorrer grandes distâncias para alcançar estes destinos finais, que podem estar localizados em municípios adjacentes. Visando diminuir a distância total percorrida para a destinação final dos RSUs, principalmente quando este localiza-se a uma distância superior



a 25 km, pode-se implantar Estações de Transbordo de Resíduos Sólidos - ETRS (BRIDE, 2008; FUNASA, 2004; PEREIRA, 2013; NUNES e SILVA, 2015).

Localizadas estrategicamente próximas aos centros de massa de geração dos RSU, as ETRSs permitem o translado dos resíduos de um veículo coletor (quando tiver atingido sua capacidade máxima) para outro veículo com capacidade maior, como, por exemplo, carretas e caminhões *roll on roll off*, que, por sua vez, percorrem o trajeto até os aterros. O transbordo se torna ainda mais vantajoso se houver triagem por possibilitar a separação dos materiais do fluxo de resíduos e identificar aqueles que possam ser inadequados para eliminação ou reciclados, diminuindo a quantidade de resíduos transferidos para os aterros sanitários. Dentre as principais vantagens das ETRSs estão: redução do tempo ocioso do serviço de coleta, do custo de transporte e do consumo de combustível por reduzir viagens ao aterro, contribuindo, ainda, para a minimização das emissões dos gases de efeito estufa.

3. ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

São diversos os problemas que podem ser modelados e solucionados com o emprego de técnicas de Pesquisa Operacional. Dentre as várias aplicações dos Problemas de Roteirização de Veículos (PRV), tem-se o sistema de coleta dos RSDs, foco principal deste trabalho. Podem ser considerados como objetivos para a coleta de RSDs a minimização da distância, do custo e do tempo totais de coleta. Para isto, o uso de modelos matemáticos associados à capacidade de análises espaciais (a partir de Sistemas de Informação Geográfica - SIG) tem sido foco de estudos em sistemas de gerenciamento ambiental (LACERDA, 2003). De acordo com Keennn (1998 apud Lacerda, 2003), algumas características padrões distinguem os PRVs e afetam a modelagem de problemas de sistemas de coletas de RSDs. Entre as mais importantes estão: a localização da demanda (em nós ou ao longo dos arcos da rede), a restrição de capacidade do veículo e o objetivo, que definirá as rotas.

No Problema de Roteirização em Arcos, a demanda de RSD está localizada em pontos próximos entre si ao longo dos arcos viários (como casas ao longo de ruas ou avenidas), simulando o sistema porta-a-porta. O objetivo consiste em encontrar uma rota que percorra todos os arcos uma única vez, minimizando a distância total percorrida e, consequentemente, os custos de operação. Já no Problema de Roteirização em Nós, a demanda de RSD localizase sobre pontos específicos da rede viária, simulando o sistema de coleta por PEVs. Assim, para o roteamento, os veículos devem percorrer todos os pontos de PEV e não mais todos os



arcos, minimizando as distâncias percorridas e, consequentemente, o número de veículos necessários para coleta de resíduo - observando as restrições de capacidade do veículo e a carga de trabalho dos funcionários (LACERDA, 2003; ROVIRIEGO, 2005). Este estudo utilizou tanto as características envolvendo roteirização de veículos em arcos quanto em nós, como apresentado na seção a seguir.

4. ESTUDO DE CASO: PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS E RESULTADOS

Por ter seu Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) recém desenvolvido, o município de Carapebus - RJ, localizado na região Norte Fluminense, foi selecionado como objeto de estudo. Semelhante à maioria das cidades brasileiras, a cobertura do serviço de coleta de RSD atinge 91,76% dos 13.359 habitantes (AGEVAP, 2020; IBGE, 2010). Os roteiros de coleta são definidos e traçados manualmente com base na experiência de trabalho das equipes, não havendo estudo ou planejamento que certifique sua eficácia.

Quanto à destinação final dos RSU, o município não possui aterro sanitário devido às exigências ambientais e os elevados custos para instalação e operação. Assim, o município utiliza um aterro sanitário localizado a 37 km de distância de Carapebus. Ao fim da coleta diária, caso o caminhão atinja a capacidade máxima, este destina-se ao aterro sanitário para efetuar o descarregamento do veículo. Caso contrário, os caminhões voltam para a garagem ainda com o material retido em seu interior para que aguardem seu carregamento total em uma próxima coleta. As longas distâncias percorridas até o aterro sanitário pelos caminhões de coleta, uma vez que não há ETRSs no município, eleva consideravelmente os custos operacionais do sistema, além do tempo dispendido para o cumprimento destas viagens, dificultando a logística da coleta e contribuindo na maximização da emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, a partir do dimensionamento da demanda de RSD, avaliou-se os benefícios decorrentes da otimização do sistema atual porta-a-porta, no *Cenário 1*, quanto da implantação de PEVs e uma ETRS, no *Cenário 2*, como descrito a seguir.

4.1. Geração de RSD: dimensionamento da demanda

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico do município (AGEVAP, 2020), são coletados cerca de 500 t de RSU por mês, não havendo informações de geração domiciliar no município ou, ainda, por região administrativa. Visando estimar esta informação, a partir da massa de RSD per capita, que é de 1,14 kg/hab.dia (SNIS, 2017), do



total de RSU gerado e do número de habitantes em cada região da cidade, divulgada pelo Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), foi possível obter a quantidade de RSD gerada por região administrativa e a quantidade total diária produzida na cidade (Tabela 12).

Regiões Administrativas	Número de habitantes	Geração de RSD média (Kg/hab.dia)
CENTRO	8.173	9.317,22
UBÁS	3.320	3.784,80
RODAGEM	1.748	1.992,72
PRAIA DE CARAPEBUS	116	132,54
Total:	13.357	15.229,26

Tabela 12 - Geração de RSD por região administrativa.

4.2. Elaboração de cenários e resultados

Visando analisar diferentes alternativas à situação atual de manejo de RSD em Carapebus, foram criados diferentes cenários de avaliação, como descrito nesta seção. A avaliação dos cenários propostos foi realizado utilizando-se a ferramenta de roteamento do *software* Caliper TransCAD. A aplicação desta metodologia pode orientar a elaboração de planejamento estratégico de políticas públicas voltadas para esse setor.

4.2.1. Cenário 0: sistema atual de coleta

Visando confrontar as alternativas de operação do sistema de manejo de RSD propostas neste trabalho com a situação operacional atual de Carapebus, fez-se necessário reproduzir o sistema atual de coleta de lixo, denominado de *Cenário 0*. Caracterizado pelo sistema porta-a-porta de coleta, os 3 caminhões compactadores de 6,5t que constituem a frota devem percorrer todas as vias com produção de RSDs. Uma vez identificadas as vias com residências (produção de lixo), buscou-se, através do método de roteamento por arcos, construir itinerários que percorram todos as vias (arcos), uma única vez, minimizando a distância total percorrida. Adotou-se, respectivamente, as velocidades de 6 km/h e 40 km/h para as vias com e sem coleta de RSDs. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13.

A média de quilômetros percorridos diariamente neste cenário foi de 515,5 km, incluindo a distância percorrida até o aterro. Já a média de resíduo recolhidos chega a 17,63 t/dia. Atenta-se para a alta solicitação na sexta-feira, que resultou em cinco rotas e,



consequentemente, cinco viagens ao aterro sanitário no mesmo dia, num total de 707,98 km percorridos. Observa-se também que, em onze das dezesseis rotas semanais, as distâncias percorridas para coleta são menores do que as distâncias percorridas até o aterro sanitário (rota 3 de segunda-feira, rota 3 de terça-feira, todas as rotas da quinta-feira e rotas 3,4 e 5 da sexta-feira). Verifica-se, ainda, que, para alguns casos, o caminhão termina o itinerário sem atingir a capacidade máxima do veículo (rota 3 de segunda-feira, rota 3 de terça-feira, rota 1 de quarta-feira, rota 3 de quinta e rota 5 de sexta-feira).

4.2.2. Cenário 1 - roteamento em arco: otimização do sistema porta-a-porta

Durante a coleta e análise de dados, bem como na análise da simulação do *Cenário 0*, constatou-se que, ao fim de algumas rotas, o caminhão coletor não atinge a capacidade máxima de carregamento do veículo, sendo conduzido ou para o aterro sanitário ou para a garagem ainda carregado, o que não é adequado. Mantendo-se a característica atual do sistema de coleta porta-a-porta (roteirização por arco), o *Cenário 1* buscou elaborar rotas para a coleta de RSD a partir da maximização do carregamento dos veículos coletores, permitindo alterar tanto a ordem quanto a frequência semanal de coleta nos bairros. Para isso, foi utilizada uma frota de 3 veículos compactadores, dois com capacidade para 6,5t e um para 7,5t. O intuito deste cenário foi eliminar as viagens ao aterro sanitário sem que o caminhão coletor atingisse a capacidade máxima. Os resultados para esse cenário são apresentados na Tabela 13.

Quando comparados ao *Cenário 0*, verifica-se melhor aproveitamento da capacidade dos veículos coletores, resultando em menor quantidade de rotas diárias, sendo a sexta-feira o dia com maior quantidade (três, no total). A média diária percorrida foi de 469,7 km, 8,9% a menos que no *Cenário 0*. Como consequência desta redução de produção quilométrica semanal, destaca-se redução nos custos operacionais e nas emissões de gases de efeito estufa.



Tabela 13 - Resultados da rotina de roteamento em arco para o *Cenário 0* e *Cenário 1*.

Rota			Total de lixo recolhido (kg)	Tempo de trabalho (h)	Bairros Servidos	
	(KIII)	(7			
Segunda a						
1	122,85	72,4	4.021,12	12,20	Centro e Ubás	
1	81,06	68,92	6.484,02	8,94	Ubás, Oscar Brito,	
2	132,09				Baixada e Santa	
3	16,80	72,42	2.455,24	2,03	Tereza	
1	64,95	72,42	6.464,5	6,67	Sapecado, Centro,	
2					Caxanga, Praça	
3	15,59	72,42	3.823,41	1,90	Cordeiro e Baixada	
1	51,65	72,42	4.561,27	5,92	Centro e Baixada	
1	51,87	72,52	6.426,06	5,31	Centro, Oscar Brito,	
2	38,94	72,52	6.473,74	4,46	Sapecado, Caxanga e	
3	31,57	72,42	3.700,50	3,14	Praça Cordeiro	
1	99,19	67,06	6.421,43	10,73	III. (. O D . ! :	
2	109,91	67,79	6.483,47	11,74	Ubás, Oscar Brito,	
3	31,34	72,33	6.494,97	4,13	Baixada, Santa	
4	68,85	74,09	6.346,43	6,42	Tereza, Barreiros,Boa Vista e Praia	
5	44,95	72,74	2.593,11	4,63	- Doa vista e Ffala	
Cenário 1						
1	117,39	72,42	7.217,16	12,19	Centro e Ubás	
1	45,97	72,42	6.377,64	5,18	Oscar Brito, Baixada e Praça Cordeiro	
2	90,2	72,42	5.784,41	8,33	Praia e Boa Vista	
1	120,71	72,42	6.325,11	12,99	Sapecado, Caxanga e	
2	121,67	72,42	6.198,79	13,07	Barreiros	
	1	Rota percorrida no setor de coleta (km) 1 122,85 1 81,06 2 132,09 3 16,80 1 64,95 2 63,26 3 15,59 1 51,65 1 51,87 2 38,94 3 31,57 1 99,19 2 109,91 3 31,34 4 68,85 5 44,95 1 117,39 1 45,97 2 90,2 1 120,71	Rota percorrida no setor de coleta (km) percorrida do setor ao aterro (ida e volta) 1 122,85 72,4 1 81,06 68,92 2 132,09 68,73 3 16,80 72,42 1 64,95 72,42 2 63,26 72,66 3 15,59 72,42 1 51,65 72,42 1 51,87 72,52 2 38,94 72,52 3 31,57 72,42 1 99,19 67,06 2 109,91 67,79 3 31,34 72,33 4 68,85 74,09 5 44,95 72,74 Cenário I 1 117,39 72,42 1 45,97 72,42 1 45,97 72,42 1 120,71 72,42	Rota Rota Rota percorrida no setor de coleta (km) percorrida do setor ao aterro (ida e volta) Total de lixo recolhido (kg) 1 122,85 72,4 4.021,12 1 81,06 68,92 6.484,02 2 132,09 68,73 6.484,87 3 16,80 72,42 2.455,24 1 64,95 72,42 6.464,5 2 63,26 72,66 6.456,83 3 15,59 72,42 3.823,41 1 51,65 72,42 4.561,27 1 51,87 72,52 6.426,06 2 38,94 72,52 6.426,06 2 38,94 72,52 6.473,74 3 31,57 72,42 3.700,50 1 99,19 67,06 6.421,43 2 109,91 67,79 6.483,47 3 31,34 72,33 6.494,97 4 68,85 74,09 6.346,43 5 44,95 72,42	Rota percorrida no setor de coleta (km) percorrida do setor ao aterro (ida e volta) Total de lixo recolhido (kg) Tempo de trabalho (h) 1 122,85 72,4 4.021,12 12,20 1 81,06 68,92 6.484,02 8,94 2 132,09 68,73 6.484,87 13,94 3 16,80 72,42 2.455,24 2,03 1 64,95 72,42 6.464,5 6,67 2 63,26 72,66 6.456,83 6,68 3 15,59 72,42 3.823,41 1,90 1 51,65 72,42 4.561,27 5,92 1 51,87 72,52 6.426,06 5,31 2 38,94 72,52 6.473,74 4,46 3 31,57 72,42 3.700,50 3,14 1 99,19 67,06 6.421,43 10,73 2 109,91 67,79 6.483,47 11,74 3 31,34 72,33 <t< td=""></t<>	

4.2.3. Cenário 2 - roteamento em nós: implantação de ETRS e PEVs

Visando reduzir a quilometragem percorrida, eliminou-se, neste cenário, as viagens dos caminhões coletores ao aterro sanitário, a partir da implantação de uma ETRS, e a necessidade de percorrerem todas as vias para a coleta dos RSD, instalando-se os PEVs.

Iniciou-se a implantação do sistema de coleta por PEVs com a localização estratégica dos pontos destinados ao depósito dos resíduos pela população. Para isso, levou-se em conta os fatores que podem influenciar significativamente a participação das pessoas nesse sistema de coleta, como a distância entre os usuários e os pontos de entrega. Os PEVs foram localizados nas interseções viárias e com distância de, no mínimo, 75 metros entre si, definida de forma a não gerar impedâncias para a população, servindo como estímulo para aderirem ao sistema. Ao todo, foram localizados 245 PEVs. O tempo de parada em cada



PEV é constituído por uma parcela fixa, de 1,5 minutos, e outra variável, em função da demanda a ser atendida, de 0,01 min/kg. A velocidade adotada nas vias foi de 30 km/h.

A localidade escolhida para a instalação da ETRS é utilizada pela Prefeitura do Município para disposição de resíduos considerados inertes, como os oriundos de poda de árvore, varrição e resíduos da construção civil. Com área aproximada de 22,1 mil m², é capaz de atender as demandas atuais e previstas de RSD e os critérios apontados por Pereira (2013), baseado em estudos de proteção ambiental, além de estar próxima às rotas centrais de coleta e possuir acesso fácil à RJ-182, rodovia que leva ao aterro. No entanto, para este estudo, não foram avaliados os fatores sociais, ambientais e econômicos da instalação da ETRS, mas sim os benefícios logísticos para o sistema de coleta. Vale ressaltar que a estação pode ser projetada para, além de receber, também estocar os RSD coletados, reduzindo-se a necessidade de viagens semanais até o aterro. Porém, neste estudo, não considerou-se estocagem, apenas transferência, realizada por um caminhão *roll on roll off* com capacidade para 18 t, sendo necessária, ao menos, uma viagem diária ao aterro, com distância de 69,5 km, considerando ida e volta.

A partir da aplicação da rotina de roteamento por nó (pontos), observou-se reduções ainda maiores nas distâncias diárias percorridas pelos caminhões coletores quando comparado com os cenários anteriores, devido à instalação da ETRS e das características do sistema de coleta adotado, que eliminou a necessidade de transcorrer todo o sistema viário (atendimento porta-a-porta). Os resultados são apresentados na Tabela 14. A quilometragem média percorrida diariamente foi de 238,1 km (redução de 53,7% e 49,3% em relação ao *Cenário 0* e *Cenário 1* respectivamente). Ressalta-se que a média diária inclui a distância percorrida diariamente no translado entre a ETRS e o aterro sanitário.

Tabela 14 - Resultados da rotina de roteamento em arco para o Cenário 2.

Identificação da Rota	Rota	Distância percorrida do setor à ETRS (km)	Total de lixo recolhido (kg)	Tempo de trabalho (h)	Bairros Servidos
Segunda a sábado (coleta noturna)	1	68,5	7217,3	4,67	Centro e Ubás,
Segunda, quarta e sexta-feira	1	22,1	6397,1	2,33	Oscar Brito, Baixada e Praça Cordeiro
Terça, quinta e	1	73,1	6439,5	4,50	Sapecado, Caxanga,
sábado	2	83,4	6070,2	4,60	Santa tereza e Barreiros
Sexta-feira	2	65,0	5.784,3	3,17	Praia e boa vista



4.2.4 Análise Geral dos Resultados

A Tabela 15 apresenta, para comparação, os totais semanais dos cenários avaliados. De forma geral, dentre as simulações realizadas, o *Cenário 2* apresentou maior redução na produção quilométrica semanal, podendo resultar em benefícios econômicos a partir da redução dos custos operacionais e nas jornadas de trabalho dos coletores.

Tabela 15 - Resumo dos resultados obtidos para uma semana de operação a partir dos cenários de simulação.

Cenários	RSD coletado (ton.)	Distância total percorrida dentro do setor de coleta (km)		Distância total percorrida (km)
Cenário 0: sistema atual de coleta	105,80	1.587,47	1.505,86	3.093,33
Cenário 1: otimização do sistema porta-a- porta	105,80	1.659,59	1.158,72	2.818,31
Cenário 2: implantação da ETRS e PEVs	105,80	1.011,80	417,00	1.428,80

O aterro sanitário, localizado a 37 km de distância de Carapebus, prejudica significativamente o sistema de coleta atual, fazendo com que os caminhões percorram grandes distâncias diárias para realizar o descarregamento, muitas vezes maiores que os percurso para coleta. Portanto, a implantação da ETRS no *Cenário 2* excluiu a necessidade excedente das viagens ao aterro sanitário pelo veículo coletor, principalmente quando este ainda não está totalmente carregado, garantindo maior produtividade do sistema e diminuição das distâncias percorridas. Como resultado do estudo de caso, observou-se que, em relação ao *Cenário 0* e *Cenário 1* respectivamente, a presença da ETRS reduziu em 72% (1.089 km) e 64% (742km) da quilometragem semanal para o aterro.

Analisando a distância total percorrida dentro do setor de coleta, nota-se que a implementação do sistema de coleta por PEVs (*Cenário 2*) resultou em redução de 36% e 39% quando comparado com o *Cenário 0* e *Cenário 1* respectivamente. Comparando-se o *Cenário 1* e *Cenário 0*, observou-se um aumento de 4,54% na distância total semanal percorrida dentro do setor de coleta, decorrente da maximização do uso do caminhão durante as coletas, atingindo, na maioria dos percursos, sua capacidade máxima.



5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo elaborar propostas para otimização do sistema de coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) do município de Carapebus – RJ, visando a redução da produção quilométrica e avaliar os benefícios decorrentes da implantação de uma Estação de Transferência de Resíduos Sólidos (ETRS). Para isto, foram construídos três cenários de avaliação: *Cenário 0*, que reproduziu o sistema atual de coleta do município; *Cenário 1*, que manteve a característica atual de coleta porta-a-porta, porém com otimização das rotas e; *Cenário 2*, com implantação da ETRS e PEVs. O processo de roteamento foi executado utilizando-se a ferramenta de roteamento do *software* Caliper TransCAD.

Identificou-se que o sistema atual de coleta é constituído por roteiros traçados manualmente com base na experiência de trabalho das equipes, sem planejamento que certifique sua eficácia. Atualmente, o aterro sanitário é localizado a 37 km de distância do município e não há ETRS. Quando comparados ao *Cenário 0*, os resultados obtidos para os cenários propostos indicaram redução de até 54% na produção quilométrica semanal, destacando-se a eficiência obtida na operação logística a partir da implantação de PEVs e da ETRS. Esta otimização operacional pode, ainda, trazer benefícios com a redução dos custos operacionais e de emissão de poluentes atmosféricos.

Como limitação deste estudo, destaca-se a ausência de informações precisas quanto à geração de RSD por regiões administrativas (ou por unidades menores de área) e informações exatas sobre os itinerários atuais dos veículos coletores, limitando a calibração do *Cenário 0*. No entanto, a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho apresentou resultados satisfatórios, podendo gerar informações relevantes para a elaboração de políticas públicas a serem adotadas pelo município para esse setor.

REFERÊNCIAS

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB)**. Produto 4 - Diagnóstico Setorial. Carapebus, 2020.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2017**. 2017.

BRAGA, B. *et al.* Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável. Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos



Sólidos e outras providências. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm> Acesso: 18 nov.2020.

BRASILEIRO, L. A.; LACERDA, M. G. **Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v.13, n.4, p.356-360, 2008.

BRIDE, E. Resíduos Sólidos Urbanos- Uma Proposta para Otimização dos Serviços de Coleta e da Disposição Final. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

PARAVIDINO, G. S. M., DOS SANTOS PINTO, V. P. **Resíduos sólidos, políticas públicas e educação ambiental**. In: IX EPEA — Encontro Pesquisa em Educação Ambiental. Juiz de Fora, 2017.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento: Orientações Técnicas.** Brasília, 2004.

LACERDA, M. G. Análise de uso de SIG no Sistema de Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares em uma Cidade de Pequeno Porte. Ilha Solteira, São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.

MONTEIRO, J. H. P. *et al.* **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

NUNES, R. R; SILVA, R. A. P. Transbordo de Resíduos Sólidos. **Revista Pensar Engenharia**, v.3, n.1, Janeiro, 2015.

MEDEIROS, R. B. *et al.* **Estudo de viabilidade de implantação de estação de transferência de resíduos sólidos urbanos na região metropolitana de Florianópolis**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Florianópolis, 2013.

OLIVEIRA, R. L. Logística reversa: a utilização de um sistema de informações geográficas na coleta seletiva de materiais recicláveis. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 2011.

PEREIRA, C. D. *et al.* **Metodologia para implantação de estação de transferência de resíduos sólidos urbanos: um exemplo de aplicação**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2013.

ROVIRIEGO. L.F.V. **Proposta de uma Metodologia para a Avaliação de Sistemas de Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Domiciliares**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com Enfâse em Transportes). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2017**.