

**PROBLEMA DE ROTEAMENTO NA COLETA SELETIVA: ESTUDO NA
COOPERATIVA REVIVER, SOROCABA – SP****Felipe Sanches Stark**Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, campus de Sorocaba – SP
Rodovia João Leme dos Santos, Km 110, SP-264, Sorocaba – SP, 18052-780
lipestar@hotmail.com**Luiza Amalia Pinto Cantão**Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Sorocaba – SP
Av. Três de Março, 511, Sorocaba – SP, 18087-180
luiza@sorocaba.unesp.br**Renato Fernandes Cantão**Centro Universitário Salesiano de São Paulo – UNISAL
Av. Almeida Garret, 267, Campinas – SP, 13087-290
rfcantao@gmail.com**Resumo**

O gerenciamento de resíduos sólidos (RS) é uma das questões ambientais que mais se destacam atualmente, dada a crescente geração e consequente necessidade de tratamento e disposição. Neste contexto, a coleta seletiva é uma medida mitigadora que permite ganhos sociais e ambientais. Como qualquer outro tipo de sistema de coleta, o estudo das etapas de transporte e a otimização é vital, por permitir ganhos operacionais que se refletem na economia de tempo propiciada pela menor distância. Na cidade de Sorocaba – SP, a cooperativa Reviver abrange uma grande área de coleta e se faz um objeto de estudo chamativo através da problemática do transporte e do roteamento de veículos na coleta seletiva. Há indícios de redução na distância percorrida em relação ao praticado habitualmente, entre 10% e 30%, dependendo da análise das distâncias. Logo, temos um Problema de Roteamento de Veículos implementado em GAMS e resolvido com CPLEX.

PALAVRAS-CHAVE: Roteamento de veículos, coleta de resíduos sólidos, modelagem.**Área Principal:** L&T – Logística e Transportes**Abstract**

The management of solid waste is one of most important environmental questions due to waste production increment and associated need of treatment and disposal. In this context selective waste collection is a mitigating measure, allowing social and environmental gains. As any other type of collection system, the study of transportation steps and their optimization is essential due to operational gains that reflect in a economy of time, given the smaller distances. In Sorocaba – SP, cooperative Reviver is responsible for a large region of the waste collection map, making it an attractive study object for the transportation problem and the vehicle routing for solid waste collection. This study shows that the run through distance can be reduced between 10% and 30%, depending on distance analysis. Thus, we have a Vehicle Routing Problem implemented in GAMS and solved with CPLEX.

KEYWORDS: Vehicle routing, solid waste collection, modelling.**Main Area:** L&T – Logistic and Transportation

1 Introdução

Com a expansão horizontal e o aumento populacional de muitos municípios, a geração de resíduos sólidos (RS) urbanos tende a mudar significativamente em diversos aspectos, destacando-se a necessidade de coleta. A taxa média anual do crescimento populacional brasileiro, por exemplo, foi de 1,17% entre 2005 e 2010, segundo IBGE, 2012a.

Uma demanda maior e uma descentralização nas áreas de coleta, bem como a necessidade de tratar-se uma quantidade crescente de RS são características presentes e futuras para boa parte dos sistemas de gestão de resíduos urbanos. Uma alternativa que começa a ser explorada de forma mais acentuada pelos municípios é a coleta seletiva e reciclagem.

Neste contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), vide PNRS, 2012, instituída pela Lei 12.305/2010, trouxe a discussão da gestão integrada de RS e tem entre seus objetivos o incentivo à indústria de reciclagem (Art. 7^o inc. VI). Isso deve permitir a curto e médio prazo o crescimento da cadeia de reciclagem e sua valorização, visando a longo prazo a diminuição da geração de resíduo e aumento da quantidade porcentual reciclada, tanto à luz do sistema atual quanto com a implantação da logística reversa declarada na PNRS (Art. 33).

O exemplo do município de Sorocaba, que atualmente exporta seu RS para um aterro situado na cidade vizinha de Iperó – SP, é um indicador de como a coleta e o correto destino dos resíduos são questões muitas vezes respondidas com medidas paliativas e arrastadas ao longo do tempo, inclusive com impactos ambientais além das fronteiras municipais.

Entretanto, como medidas socioambiental e socioeconômica para tentar melhorar este cenário, a cidade conta há quase duas décadas com cooperativas de reciclagem que atuam na coleta e separação de materiais. Atualmente são quatro cooperativas existentes no município e o presente estudo foca na segunda maior cooperativa, chamada de Reviver.

Apesar do apoio municipal no fornecimento do local para o depósito e veículos presentes no centro de reciclagem, as cooperativas envolvidas demandam por parcerias técnicas que viabilizem a gestão operacional a longo prazo, tanto para minimização de custos quanto para maximização do uso das estruturas operacionais.

Desta forma, focamos nos problemas de roteamento de veículos, cuja origem está no “Problemas do Caixeiro-Viajante”. Estes tratam de um conjunto de cidades (nós) pelos quais o Caixeiro-Viajante sai de uma cidade inicial e faz uma única visita a cada cidade, formando um circuito ou um subcircuito.

Estes problemas se desenvolvem em redes formadas por nós (origens e destinos), com ligações representativas de distância, tempo ou mesmo probabilidade (rota mais confiável), com grafos orientados ou não (vias em um único sentido ou duplo, respectivamente).

Quando são envolvidos fatores adicionais como limite de tempo e veículos de diversas capacidades, surge um problema de roteamento de veículos restrito ao tempo. Neste caso há a necessidade de um projeto de rotas de entrega e/ou coleta, partindo de um ou mais depósitos para um número de clientes, sujeito às restrições adicionais (veículos e tempo), como visto em ARENALES et al., 2007. Adaptando ao contexto da coleta seletiva, alguns fatores presentes foram:

- Veículos disponíveis (número e capacidade);
- Locais de demanda na coleta (localização espacial, proximidade e acessibilidade);
- Horário disponível para coleta (tempo da jornada de trabalho em horas).

O depósito de material reciclado é o ponto inicial e final, sendo os veículos destinados às rotas que permitam melhor aproveitamento do tempo e da capacidade de coleta de cada um, baseadas nos horários de coleta estabelecidos junto aos clientes (local de coleta) e no menor caminho a ser percorrido.

No modelo podem ainda ser inseridas considerações como a criação de áreas que agreguem pontos de coleta próximos, por exemplo, as lixeiras (*bins*) são agregadas em macro lixeiras (*macrobins*) NUORTIO et al., 2006; de forma análoga, as casas de uma determinada rua podem ser representadas por apenas um ponto, centralizado na rua específica e estas ruas formam regiões de coleta (nós).

Dentre as referências pesquisadas, as aplicações e finalidades dos estudos de roteamento e gerenciamento da coleta do RS são diversas. Tratam desde a predição do cenário de coleta de resíduos com aumento na demanda, mudanças nas políticas públicas e disponibilidade de formas de tratamento, como em DAI et al., 2011, até questões de curto prazo como escolha das rotas baseadas no cenário atual de uma região como visto em BRASILEIRO e LACERDA, 2008.

Com esta variabilidade de abordagens, os métodos utilizados também se distinguem quanto à abrangência e forma dos dados. Muitos autores realizam aproximações probabilísticas nos seus modelos, desde regressões como em DAI et al., 2011 até o uso de Teoria Fuzzy, como apresentado em WANG et al., 2012. Essa abordagem de métodos variados se deve ao fato de dados poucos precisos na questão da geração de RS. Nas abordagens determinísticas, geralmente o foco é em soluções de curto prazo, com métodos clássicos de programação linear como em KARAOGLAN et al., 2011 e programas de sistemas de informações geográficas, como ArcGIS ou TransCAD como em BRASILEIRO e LACERDA, 2008.

Portanto, o foco deste trabalho visa a melhora no processo de coleta seletiva e os ganhos econômico-ambientais municipais para a cooperativa Reviver, abrindo caminho para futuras parcerias técnicas importantes na gestão municipal de RS.

O presente estudo faz uso do modelo explicitado no trabalho de GONÇALVES, 2010 já que este apresenta desenvolvimento semelhante ao modelo da literatura básica de ARENALES et al., 2007. O modelo é um Problema de Programação Inteiro Misto, ou *mixed integer problem* (MIP), implementado no GAMS (versão 23.7) e resolvido com o solver CPLEX (versão 12.3).

2 O Problema

Através da cooperativa Reviver, obtivemos as seguintes informações:

- *Nome dos locais de coleta*: logradouros (ruas e bairros) e demanda (número de casas);
- *Dados de tempo*: dias da semana, horários disponíveis para a coleta e expediente;
- *Dados das características dos veículos*: velocidade média de viagem até o local de coleta, velocidade durante a coleta e capacidade volumétrico-mássica;

As distâncias entre os locais de coleta e a distância percorrida internamente em cada nó foram medidos pelo Google Maps, 2012 e o modelo resolvido pelo software GAMS 23.7 (compilador) e CPLEX 12.3 (solver).

Inicialmente é feita a marcação dos pontos de coleta, a agregação dos nós e a aferição das distâncias internas e entre os nós. Posteriormente são efetuados os cálculos de tempos gastos, demanda de cada nó e em seguida a resolução baseada no modelo de GONÇALVES, 2010.

Para a identificação dos pontos de coleta partimos dos dados fornecidos pela administração da cooperativa Reviver. As ruas em que há coleta foram identificadas e localizadas com o auxílio do Google Maps.

O controle foi realizado a partir do primeiro e do último número da residência ou empreendimento em que a cooperativa executa a coleta. Para grandes geradores, como empresas ou condomínios, há um ponto representante deste local (Figura 1).

Para a formação dos nós, a cada grupo de ruas próximas foi designado um nó que represente a localidade. As informações como número de casas em cada nó (para o cálculo da demanda) e

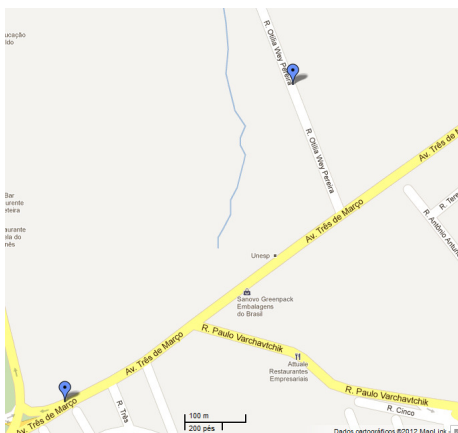


Figura 1: Marcação de pontos de coleta.

também o comprimento total das ruas dentro dos nós foram identificados. Estas distâncias internas foram calculadas com o auxílio da ferramenta “Rota” (botão “Como Chegar” do Google Maps) entre os pontos nas ruas que formam os nós (Figura 2).

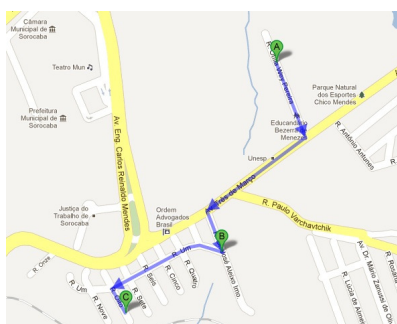


Figura 2: Distância interna do nó anterior (notar condomínio na parte inferior esquerda).

As distâncias internas de cada nó são multiplicadas pela velocidade de coleta (dado operacional) para que o tempo de serviço dentro de cada nó seja utilizado na restrição de tempo.

A demanda é calculada com base na coleta mensal, em toneladas, da cooperativa Reviver dividida por semana e posteriormente dividida proporcionalmente por cada nó, isto é, quanto à porcentagem de casas do nó em relação ao total.

As distâncias intra-nós e entre nós e o depósito foram calculadas com o auxílio do Google Maps (veja Figura 3 para um exemplo da ida e volta entre nó 1 e nó 2). Para calcular esta distância, o nó foi representado por um ponto escolhido de maneira visual de forma a se localizar na rua mais próxima ao seu centro. Deste modo, as distâncias são assimétricas, isto é, a distância de ida (1 para 2) não é igual a da volta (2 para 1).

Estas distâncias foram multiplicadas pela velocidade do veículo quando não está em coleta (dado operacional fornecido pela administração) e os tempos encontrados de viagem entre os nós servirão às restrições do limite de tempo.

Em termos matemáticos, tem-se um grafo orientado $G = (N, E)$, no qual:

- $C = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós dos locais de coleta; no exemplo, os nós são os apresentados de i até n ;
- $N = C \cup \{0, n + 1\}$ é o conjunto de nós do depósito, isto é, os nós 0 e $n + 1$ pertencem ao depósito como início e fim, respectivamente;

- $E = \{(i, j) / i, j \in N, i \neq n, j \neq 0\}$ corresponde aos arcos que ligam os nós (setas orientadas entre os nós).

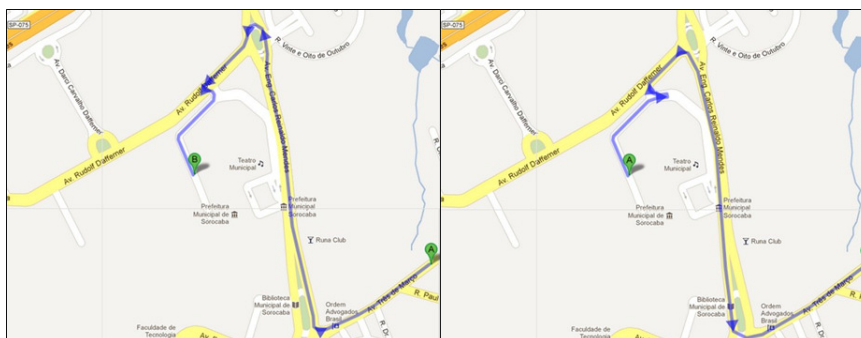


Figura 3: Rota externa entre nó 1 e 2 (A e B, respectivamente na esquerda).

Adicionalmente nenhuma rota pode terminar no nó 0 ou começar no nó $n + 1$. Todas começam no nó 0 e devem terminar no nó $n + 1$ pois tratam-se dos nós do Depósito. Entretanto, dependendo do autor ou do método utilizado, pode-se considerar o final e o começo de cada rota como o nó 0.

Ainda, para cada ponto de coleta tem-se:

- Um custo c_{ij} ao passar pelo nó i . No presente estudo o custo será igual à distância, ou seja, distância entre os nós i e j ;
- O tempo gasto no nó i para o serviço de coleta e o tempo de viagem do nó i até o nó j , chamado de t_{ij} e;
- Uma demanda de coleta do nó i , denominada de d_i .

O conjunto de veículos K está situado no depósito, sendo $k \in K$ cada veículo com capacidade Q . Deste modo o objetivo é minimizar o custo total das viagens (neste caso a distância será utilizada na função objetivo), sujeito às restrições:

- Cada rota inicia e termina no depósito (nó 0 e $n + 1$);
- Cada ponto de coleta é atendido apenas uma vez e por uma única rota;
- A coleta não deve exceder a capacidade dos veículos;
- O tempo de viagem deve ser menor que o limite do turno de trabalho.

A variável de decisão é dada por:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se o veículo } k \text{ percorre o arco } (i, j), \forall k \in K, \forall (i, j) \in E; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Finalmente, a formulação do problema de Roteamento de Veículos é dada por:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in N} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq t_{disp} \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1,k} = 1, \quad \forall h \in C, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad S \subset C, \quad 2 \leq |S| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \quad \forall k \in K. \quad (8)$$

$$x \in B^{K|E|} \quad (9)$$

Cada equação tem uma finalidade:

- Equação (1): Representa a minimização do custo total das rotas;
- Equação (2): Cada cliente i é atendido por um único veículo;
- Equação (3): A demanda total de cada rota não deve exceder a capacidade do veículo;
- Equação (4): Impõe o limite de tempo da rota ao tempo disponível (t_{disp});
- Equação (5): Impõe restrições de fluxo em rede para que cada veículo k saia do depósito uma única vez, daí $i = 0$;
- Equação (6): Impõe restrições de fluxo em redes para que o veículo só deixe o nó (h) se e somente se entrar neste nó;
- Equação (7): Impõe restrições de fluxo em redes para que retorne ao depósito somente uma vez;
- Equação (8): Garante a não existência de sub-rotas, isto é, rotas que deixem algum nó sem atendimento, sendo que o módulo de S é limitado inferiormente por 2 e superiormente pelo inteiro inferior da divisão de n por 2. No modelo utilizado, esta restrição é substituída por:

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ijk} \leq n - 1, \quad (10)$$

onde u_i e u_j representam variáveis de decisão inteiras associadas a cada nó (número n). A variável x_{ijk} uma variável binária com valor 1 caso exista a ligação entre o ponto i e o ponto j na rota k e 0 caso contrário.

- Equação (9): Indica o tipo de variável, isto é, as variáveis x são binárias e assim, após todas as restrições tem-se que o problema é linear inteiro.

No caso do modelo utilizado, a função objetivo foi a minimização das distâncias externas aos nós, restritas ao tempo de atendimento dos nós da rota e a capacidade dos veículos com relação à jornada diária máxima permitida pela cooperativa.

3 Resultados

3.1 Área de atuação da cooperativa Reviver e dados operacionais

A cooperativa Reviver possui a área de coleta apresentada na Figura 4. Nas áreas indicadas situam-se 401 ruas e 6404 pontos atendidos entre casas e pontos fixos, sendo pontos fixos aqueles

representados por locais de coleta não domiciliar como empresas, prédios administrativos e outras organizações. São estes equivalentes a 10 casas no modelo e em certos casos, por estarem distantes dos outros pontos, sendo considerados um nó. De acordo com a administração, a velocidade de coleta é de 1,6 km/h e a de trânsito entre os locais de coleta é de 18 km/h. A capacidade nominal do caminhão é de 2.000 kg, entretanto para o modelo utilizou-se 1.500 kg, com tempo de jornada de trabalho em 7 horas/dia. A demanda por casa, com base no valor coletado pela cooperativa, foi de 2,19 kg/semana.

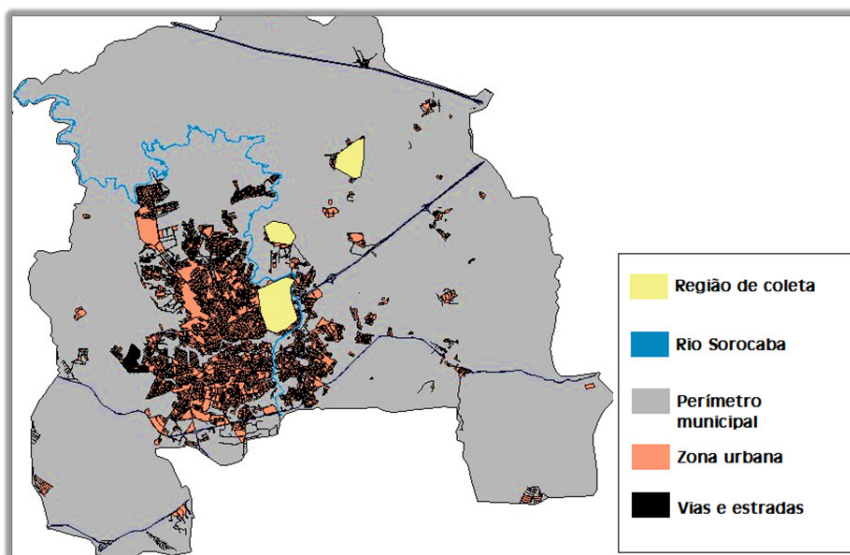


Figura 4: Área de atuação - cooperativa Reviver.

3.2 Características dos nós

Da área de abrangência agruparam-se as ruas em 66 nós, com o nó 0 sendo a cooperativa. Houve a necessidade de agrupar os nós, como descrito na seção 2, devido ao excessivo número de variáveis de decisão gerado se considerarmos as 401 ruas e 6404 pontos atendidos, possibilitando ao software e à máquina, uma solução para o problema. Os nós foram agrupados por proximidade sem testar outras possibilidades de agrupamento, considerando o mapeamento sugerida pela cooperativa. Os dados das distâncias entre nós não aparecem explicitamente aqui já que se trata da permutação de 67 pontos, dois-a-dois, o que resultou em 4489 dados. Na Tabela 1, mostra-se apenas a matriz assimétrica gerada entre o nó 0 e 10 para ilustrar a formação e estrutura dos dados.

Os altos valores encontrados na linha e coluna 0 se devem ao fato do centro de reciclagem ficar distante dos pontos de coleta antigos da cooperativa, que antes operava em um barracão no Jardim Iguatemi.

Os valores da diagonal são todos zeros, pois não há distância entre o próprio nó, e na minimização as equações de entrada e saída do nó servem para que o modelo não apresente falha através desta diagonal das distâncias como possíveis caminhos em uma rota.

Nota-se a diferença entre a ida e volta dos nós 1 e 2 é de 100 metros (valores destacados), daí a importância do uso das distâncias como assimétricas (ida diferente da volta) para um resultado mais condizente com os valores *reais* de distâncias.

Nó	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	8.8	8.3	7.7	9.6	11.2	11.5	15.5	13.8	15.2	15.2
1	8.6	0	<u>2.2</u>	2.5	1.9	3.6	4.3	8.1	8.7	7.7	8.4
2	9.7	<u>2.1</u>	0	1.2	1.2	3.3	3.6	7.4	8	7	7.7
3	9.5	1.9	0.6	0	1.1	3.1	3.5	7.2	7.9	6.8	7.5
4	9.7	2.1	1.2	1.5	0	3.1	3.4	7.1	7.3	6.8	7.5
5	11.5	3.6	3.5	3.8	2.8	0	1.2	4.9	5.1	4.6	5.3
6	13.4	6.3	5.4	5.7	5.4	4.2	0	3.7	4.4	3.3	4
7	15.8	8.3	7.4	7.7	7.4	6.6	5.1	0	2.3	1.3	2
8	12.3	8.2	7.3	7.6	7.3	5.9	4.4	2.2	0	1	1
9	14.6	7.6	6.7	7	6.7	5.9	4.4	1.4	1	0	0.6
10	13.2	8.1	7.2	7.6	7.3	6.4	5	1.9	0.9	0.7	0

Tabela 1: Distância externa (em quilômetros) entre os nós 0 até 10 como exemplo das distâncias aferidas pelo Google Maps.

3.3 Roteamento dos veículos

O roteamento completo abrangeu 66 nós com demanda, distâncias e tempos. O modelo foi implementado no GAMS e resolvido pelo solver CPLEX, em um equipamento com um processador Core 2 Quad 2.3 GHz e 6 GB de memória RAM. Os tempos computacionais para obtenção das soluções foram desprezíveis. Para a comparação real-computacional, excluiu-se a distância entre o depósito e o nó, no início e término de cada rota, pois nas rotas fornecidas pela cooperativa não há a exatidão de quando ou quantas vezes há o retorno do caminhão para a cooperativa ao longo do dia. Assim, a solução fica aberta para a comparação apenas a partir do nó que se inicia a coleta, mitigando a influência externa como vontade do motorista, quebra de veículos ou inversão de rotas (fazer de manhã uma rota e de tarde outra rota).

A distância real das rotas feitas pela cooperativa foi obtida no Google Maps, com o auxílio dos pontos previamente marcados em sequência, deste modo os valores somados (sem a distância do ponto inicial – depósito, e ponto final – depósito) foram de 327,7 km por semana. Esta distância é percorrida por três veículos ao longo da semana.

Durante a resolução do problema com 66 nós surgiu a necessidade de separá-los em três subproblemas, pois mesmo usando completamente a memória disponível na máquina, nenhuma solução pôde ser encontrada. As áreas abrangidas pelos três subproblemas foram escolhidas baseando-se na Figura 4, onde destacamos os pontos de coleta. As três regiões foram divididas conforme a Tabela 2.

Região 1	Região 2	Região 3
Nó 0 até 26	Nó 0 e 27 até 46	Nó 0 e 47 até 66

Tabela 2: Divisão das regiões de abrangência da cooperativa REVIVER.

No resultado final encontrado, a distância total percorrida é dada pela soma do que foi percorrido sem o nó 0 (total de 85,2 km) acrescido do valor total das distâncias internas de todos os 66 nós (141,23 km). As rotas obtidas são apresentadas na Tabela 3.

Deste modo, o valor para comparação sem o depósito é 226,5 km, resultando numa redução de 31% em relação ao praticado pela cooperativa, entretanto foram sugeridas 17 rotas de coleta. Como são disponíveis apenas 15 rotas possíveis e praticadas semanalmente, dadas a disposição de 3 caminhões e de 5 dias úteis de trabalho, uma sugestão válida seria a coleta quinzenal de

Região	Rota	Peso coletado (kg)	Distância percorrida (km)	Distância sem o depósito (km)	Tempo total
1	1: (0, 3, 21, 18, 17, 12, 0)	1362,18	34,5	13,2	6h38m
	2: (0, 22, 23, 24, 14, 13, 0)	740,22	31,4	2,6	6h59m
	3: (0, 1, 4, 19, 20, 25, 0)	1049	33,8	11,2	6h53m
	4: (0, 2, 6, 16, 15, 11, 10, 0)	805,92	30,7	9,2	6h47m
	5: (0, 5, 7, 9, 26, 8, 0)	551,8	31,4	7,9	6h42m
2	6: (0, 44, 43, 0)	400,77	12,2	0,5	3h56m
	7: (0, 47, 27, 28, 40, 41, 42, 0)	1495,77	18,0	3,2	5h42m
	8: (0, 45, 46, 0)	851,91	11,5	0,4	6h12m
	9: (0, 32, 33, 34, 35, 0)	987,69	17,1	2,6	6h46m
	10: (0, 39, 38, 30, 0)	869,43	24,5	10,8	6h51m
	11: (0, 29, 31, 37, 36, 0)	994,26	22,2	7,4	6h25m
3	12: (0, 61, 64, 65, 0)	751,17	10,1	1,9	6h38m
	13: (0, 63, 57, 56, 0)	427,05	10,8	0,8	6h37m
	14: (0, 48, 49, 60, 0)	455,52	13,4	5,2	7h00m
	15: (0, 59, 58, 52, 50, 0)	819,06	14,3	3,4	6h58m
	16: (0, 53, 66, 62, 0)	788,4	13,1	3,0	6h56m
	17: (0, 55, 54, 51, 47, 0)	956,08	13,6	1,9	6h53m

Tabela 3: Resultados.

recicláveis nas rotas que possuem mais pontos fixos. Essa sugestão é possível graças à facilidade de coleta nesses pontos, pois são coletadas quantidades substanciais de forma única e as capacidades dos veículos não seriam subutilizadas.

Indicando a possibilidade de melhoria, mesmo com 17 rotas sugeridas na solução, se os valores médios de ida (8 km) e de volta (11,2 km) forem aproximados em 19 km por rota, a estimativa para a cooperativa é de 285 km percorridos entre ida e volta até os nós por semana. Somados aos 327,7 km obtidos através do Google Maps ao que é praticado, tem-se 612,7 km totais percorridos por semana pelos 3 caminhões da cooperativa. Uma comparação com ida-volta estimada tem-se 549,5 km percorridos incluindo-se o depósito, isto revela uma economia global de aproximadamente 10%.

Restringindo em 7 horas a jornada diária de trabalho, a coleta demanda maior quantidade de rotas que são apresentadas como solução. Em algumas rotas apresentadas foram apenas 2 pontos coletados e retornados ao depósito; esse acontecimento pode indicar a necessidade de nós menores e conseqüentemente de mais regiões separadas para a obtenção da solução no todo.

Esta última resposta, entretanto, permite que sejam coletados maior quantidade de recicláveis, desde que não haja expansão horizontal do município, uma vez que o tempo de coleta não é afetado pela quantidade coletada e sim pela distância e quantidade de casas/pontos a serem atendidos. Vale observar que na solução sugerida diversas rotas ficaram muito abaixo da capacidade limite dos veículos, como nas rotas 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 que ficaram abaixo de 1000 kg de carga utilizada no veículo.

Nesse sentido, como a distância percorrida encontrada foi menor que a praticada e tanto a capacidade dos caminhões quanto o tempo são respeitados nas rotas atuais da cooperativa, alguns dos parâmetros não são verossímeis. Possivelmente a velocidade de coleta do nó é maior na prática do que o dado operacional, pois um acréscimo, mesmo que apenas para uma velocidade de 2 km/h, por exemplo, já representam 25% a mais dos 1,6 km/h.

4 Conclusão

No resultado final houve indícios de redução de 31% sem o depósito, dando razão para a melhoria e revisão nas rotas praticadas pela cooperativa, mas ao mesmo tempo não permite uma comparação global com o praticado realmente uma vez que o retorno à cooperativa pode ser feito com certa flexibilidade pela equipe do veículo, motivo da escolha de limite de 7 horas como jornada máxima diária no modelo, pois os cooperados estendem o seu horário de trabalho devido ao uso do banco de horas como forma de remanejar a jornada de trabalho.

Ambientalmente, se a redução do praticado pela cooperativa sem a ida e volta do depósito (327,7 km) fosse de 10%, por exemplo, a redução do uso de combustível pode ser de 11 litros semanais (rendimento em 3 km/L de diesel), logo 30% permite na teoria a economia de 132 litros/mês. Outros ganhos como aumento da vida útil de pneus e de componentes dos veículos são sentidos a longo prazo, mas são importantes dada a necessidade de uma frota consistente para o serviço de coleta e transporte.

Deste modo, o foco do planejamento das rotas, no caso da cooperativa, deve ser sempre buscar a melhoria no tempo de coleta dentro dos nós, o que ocorre de forma ainda lenta e que demandaria maior sincronismo entre a pessoa que entrega o material a ser reciclado para a cooperativa bem como de quem coleta. Se esse aumento da velocidade de coleta for viabilizado, as soluções apresentadas se tornam ainda mais atraentes visto que mais rotas são agrupadas em um mesmo dia, de acordo com o tempo disponível e o exigido por cada uma destas.

O local onde se situa a cooperativa indica que boa parte dos gastos com transporte (capital e temporal) é influenciada pela nova distância (a cooperativa mudou de sede em 2011), pois evidenciou-se que a distância média de ida-volta é de quase 20 km por rota (ou 1 hora percorrida somente entre ida-volta todos os dias). Se o depósito pudesse ser realocado para outra região próxima aos pontos de coleta, ou mesmo que houvesse a criação de locais de transbordo, o ganho operacional da coleta seria aumentado.

Os benefícios ambientais da redução das rotas realizadas não se refletem apenas na economia de combustível ou dos bens móveis (caminhões), melhoram também a qualidade de atendimento (rapidez e pontualidade de coleta) e separação de material (o tempo economizado em uma rota pode ser utilizado na expansão da coleta seletiva ou na separação do material já coletado).

Agradecimentos

Ao Sr. Silvio Luz, administrador da cooperativa Reviver, por nos receber de portas abertas e fornecer os dados operacionais das rotas e do coletado pela cooperativa para a realização deste estudo, além das conversas sobre os procedimentos operacionais e demais esclarecimentos.

À FUNDUNESP e ao Programa RENOVE (Edital 14/2012) pelo apoio financeiro para a execução deste projeto.

Referências

- ARENALES, M., ARMENTANO, V. A., MORABITO, R., e YANASSE, H. H. (2007). *Pesquisa Operacional*. Elsevier, Rio de Janeiro. 523 p.
- ARRIBAS, C. A., BLAZQUEZ, C. A., e LAMAS, A. (2009). Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management & Research*, pages 355–363. Acesso em: 16 de novembro de 2011.
- BALLOU, R. H. (2001). *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial*. Bookmann, Porto Alegre, 4a edition.

- BAZARAA, M. S., JARVIS, J. J., e SHERALI, H. D. (1990). *Linear Programming and Network Flows*. John Wiley & Sons, New York, 2a edition. 684 p.
- BRASILEIRO, L. A. e LACERDA, M. G. (2008). Análise do uso de sig no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 13(4):356–360. Acesso em: 4 de maio de 2012.
- DAI, C., LI, Y. P., e HUANG, G. H. (2011). A two-stage support-vector-regression optimization model for municipal solid waste management: A case study of beijing, china. *Journal Of Environmental Management, Epub*, pages 3023–3037. Acesso em: 04 de maio de 2012.
- GONÇALVES, F. M. M. (2010). Optimização de um sistema de distribuição capilar: O caso da autosil. Master's thesis, Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia e Gestão, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. Acesso em: 04 de novembro de 2011.
- GOOGLE INC. (2012). GOOGLE MAPS. Acesso em: 10 de janeiro de 2012.
- IBGE (2012a). IBGE. Cidades@. Acesso em: 06 abril de 2012.
- IBGE (2012b). IBGE. Países@. Acesso em: 06 abril de 2012.
- KARAOGLAN, I., ALTIPARMAK, F., KARA, I., e DENGIZ, B. (2011). A branch and cut algorithm for the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery. *European Journal Of Operational Research*, pages 318–332. Acesso em: 04 de novembro de 2011.
- NUORTIO, T., KYTÖJOKI, J., NISKA, H., e BRÄYSYET, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems With Applications: An International Journal*, 30(2):223–232. Acesso em: 16 de novembro de 2011.
- PNRS (2012). Política nacional de resíduos sólidos. Acesso em: 06 de abril de 2012.
- SNYDER, L. (2011). VRPSolver. Acesso em: 16 de novembro de 2011.
- TAHA, H. A. (2008). *Pesquisa Operacional: Uma visão geral*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 8a edition. 363 p.
- WANG, S., HUANG, G. H., e YANG, B. T. (2012). An interval-valued fuzzy-stochastic programming approach and its application to municipal solid waste management. *Environmental Modelling & Software*, pages 24–36. Acesso em: 13 de abril de 2012.