

Determinação da rota ótima para a coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo - RS

Fábio Roberto Barão

Faculdade de Ciências Econômicas, Administrativas e Contábeis, Universidade de Passo Fundo
99001-970, Passo Fundo, RS
E-mail: fbarao@upf.br

Moacir Kripka

Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Passo Fundo
99001-970, Passo Fundo, RS
E-mail: mkripka@upf.br

Rosana Maria Luvezute Kripka

Instituto de Ciências Exatas e Geociências, Universidade de Passo Fundo
99001-970, Passo Fundo, RS
E-mail: rkripka@upf.br

Resumo: A instituição de programas de coleta seletiva, que podem ser compreendidos como a separação, na fonte geradora, de resíduos orgânicos (tais como restos de comida) e inorgânicos (como papel/papelão, plástico, metais e vidros), vem se mostrando uma das ferramentas mais amplamente utilizadas como parte de programas que visam o gerenciamento apropriado dos resíduos sólidos. Todavia, esses programas baseiam-se em uma grande parcela de motivação da população para se atingir níveis satisfatórios de desempenho. Com foco em aprimorar os esforços empreendidos, foi proposta a disposição de postos de entrega voluntária de materiais recicláveis na região central do município de Passo Fundo, localizado na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, buscando-se a minimização da distância a ser percorrida pelo usuário do sistema até o posto mais próximo. O presente trabalho apresenta a aplicação do clássico problema do caixeiro viajante na determinação da rota mais eficiente para coleta desses resíduos e sua posterior destinação no aterro sanitário municipal. As rotas ótimas foram obtidas segundo as seguintes estratégias: considerando as distâncias euclidianas, as vias de acesso e as vias de acesso com o sentido do tráfego. Os resultados do presente estudo apontam um modelo de fácil reprodução e que poderá ser repetido quando necessário, tanto para a inserção de novos postos de coleta como

para a aplicação do estudo em diferentes áreas urbanas.

1. Introdução

No cerne do tão almejado desenvolvimento sustentável reside a questão de se aliar o crescimento econômico à preservação e uso racional dos recursos naturais, assegurando condições às presentes e futuras gerações do atendimento de suas necessidades básicas. Nesse contexto, a correta e apropriada destinação dos resíduos sólidos provenientes das atividades da comunidade de origem doméstica em suas regiões urbanas municipais, destaca-se como um dos principais temas de discussão, uma vez que o mesmo tem impacto direto na qualidade de vida dessas comunidades face a seu perene crescimento.

Segundo Cheremisinoff (2003) os governos, que são os principais responsáveis pelos programas de gerenciamento de resíduos sólidos, usualmente dispõem de três estratégias principais para a destinação dos resíduos: compostagem, incineração e aterros sanitários. A compostagem, um processo que envolve bactérias como agentes de decomposição dos resíduos em aditivos ao solo, é útil na destinação de certos resíduos orgânicos, o que auxilia na redução do volume de resíduos a serem destinados. Já a incineração envolve a queima dos resíduos sólidos que, além de diminuir

consideravelmente o volume de resíduos, também pode gerar energia na forma de vapor ou de eletricidade, mas gera também uma perigosa emissão de substâncias tóxicas como dioxinas, furanos, dióxidos de enxofre e óxido de nitrogênio, bem como as cinzas resultantes do processo. Devido ao fato de que essas alternativas deixam parte dos resíduos sem tratamento ou produzem algum tipo de resíduo, a adoção de aterros sanitários vem se mostrando como uma abordagem definitiva à questão do gerenciamento de resíduos.

Com o aumento na escassez de espaço para a construção de aterros sanitários e com os extensos, complexos e caros processos de localização e construção de incineradores, a reciclagem, aliada à coleta seletiva dos resíduos, vem se tornando uma alternativa significativa no que tange aos sistemas de gestão dos resíduos sólidos em diversos países, sendo que uma das práticas mais comumente utilizadas para se obter uma melhora na efetividade dos custos de coleta está na separação desde a fonte geradora aliada ao uso de contêineres específicos e de veículos dedicados para o transporte desses materiais até a sua área de destinação (CHANG e WEY, 2000).

A exemplo de tais abordagens, o município de Passo Fundo, localizado na região do Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul, também conta com um sistema integrado de coleta e destinação de seus resíduos sólidos, provido de um aterro sanitário controlado, mas ainda não se serve de um programa efetivo de separação de resíduos na fonte geradora, valendo-se atualmente de uma pré-seleção dos resíduos anterior à sua destinação final, o que torna o processo pouco eficaz sob o ponto de vista de se estender a vida útil do aterro sanitário, minimizando os impactos ambientais de tal atividade.

Com vistas a apresentar um modelo para a introdução de um programa de coleta seletiva de resíduos para o município de Passo Fundo, os autores propuseram a utilização de modelos matemáticos de otimização com o foco em aprimorar os esforços empreendidos (BARÃO, 2008). De acordo com Mohd et al (2004) e Morrissey e Browne (2004), esses modelos podem desempenhar um papel proeminente

no planejamento efetivo de custos no longo prazo para sistemas dessa natureza, pois a disposição de contêineres para separação de materiais deve ser meticulosamente planejada para garantir a quantidade e densidade do material a ser coletado. Além disso, também afirmam que o transporte desempenha um papel muito importante e que deve ser cuidadosamente investigado em face aos custos operacionais envolvidos.

A partir da disposição de contêineres destinados à coleta de resíduos sólidos urbanos na região central do município de Passo Fundo, o presente trabalho apresenta a aplicação do clássico problema do caixeiro viajante na determinação da rota para a coleta dos resíduos depositados nesses contêineres e sua posterior destinação no aterro sanitário municipal, de forma a minimizar a distância percorrida na execução dessa tarefa. Um maior detalhamento com relação ao problema de disposição ótima dos contêineres pode ser encontrado no trabalho de Barão (2008).

No próximo item deste trabalho são apresentados os problemas abordados na proposição do sistema de coleta seletiva, com ênfase ao problema de roteamento de veículos. No terceiro item descrevem-se os resultados obtidos a partir da aplicação da formulação. Por fim, são apresentadas as conclusões e algumas considerações gerais.

2. Problema de roteamento

O termo roteamento de veículos, embora não encontrado nos dicionários de língua portuguesa, é a forma que vem sendo utilizada como equivalente ao inglês “*routing*” (ou “*routeing*”) para designar o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou seqüências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. O termo roteirização de veículos também é utilizado alternativamente por alguns autores. O problema de roteamento de veículos consiste em definir roteiros de veículos que minimizem o custo total de atendimento, onde cada um deles inicia ou termina no depósito ou base dos veículos, assegurando que cada ponto seja visitado exatamente

uma vez e a demanda em qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende.

Sob a ótica de otimização, os problemas de roteamento de veículos, incluindo o caso particular do caixeiro viajante, pertencem à categoria conhecida como NP-difícil (do inglês “*NP-hard*”), o que significa que possuem ordem de complexidade não polinomial (GOLDBARG, 2005). Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce significativamente de acordo com o tamanho do problema (dado pelo número de pontos a ser atendidos).

Devido a restrições orçamentárias, a Prefeitura de Passo Fundo optou por adquirir 20 contêineres com capacidade para mil litros cada. Assim, o sistema proposto consistiu inicialmente na disposição destes 20 contêineres na região central da cidade. De acordo com a proposta de McDougall (2001), uma das formas mais plausíveis para a disposição dos bancos de coleta de materiais está na localização destes nas esquinas, uma vez que os moradores poderiam caminhar até os pontos de coleta desde suas residências. A partir dessa determinação foram numeradas individualmente todas as intersecções viárias da área de estudo, resultando assim em 240 pontos possíveis candidatos a receber um dos contêineres. O problema das *p*-medianas foi formulado como (ARENALES ET AL, 2007):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \\ \text{Sujeito a } & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^n x_{ii} = p \\ & x_{ij} \leq x_{ii} \quad , i, j = 1, \dots, n \\ & x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

onde: $[d_{ij}]$ é uma matriz simétrica de custo (distância); $[x_{ij}]$ é a matriz de alocação; p é o número de facilidades (medianas) a serem localizadas e n é o número de nós na rede.

Uma vez determinados os 20 pontos ótimos para a localização dos postos de coleta, dentre 240 pontos candidatos (BARÃO, 2008), o passo seguinte consistiu

no estabelecimento da rota que deveria ser cumprida pelo veículo coletor, visando minimizar a distância total percorrida, bem como garantir o atendimento a todos os pontos.

Considerando que a operação de coleta dos contêineres não está sujeita a condicionantes temporais, ou seja, não existe um horário determinado para a coleta de cada ponto, a estratégia de solução passa a ser direcionada somente aos aspectos de distância entre os pontos a serem atendidos, o que remete ao clássico problema do caixeiro viajante (PCV), como melhor forma de se propor um roteiro (GOLDBARG, 2005):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } z &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{Sujeito a } & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \\ & \sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N \\ & x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \end{aligned}$$

É importante ressaltar que, para a elaboração desse modelo, não foi considerada a capacidade de carga do veículo coletor, tendo em vista que as quantidades de resíduos depositadas em cada ponto de coleta também não foram mensuradas. Dessa forma, com a finalidade de simplificar o problema considerado, assumiu-se que no caso do veículo coletor chegar ao limite de sua capacidade, durante o percurso, o mesmo retornará ao seu ponto de descarga e retomará a rota de coleta a partir do último ponto coletado.

A formulação clássica pra o PCV foi implementada no aplicativo Lingo® e, da mesma forma que a formulação das *p*-medianas, essa formulação foi testada com modelos de soluções conhecidas para assegurar a exatidão da formulação. Ao se elaborar a matriz de distâncias para os moradores não se fez necessário levar em consideração o sentido do tráfego, uma vez que se assume que os moradores deverão caminhar até os postos. Todavia, em se tratando do roteamento do veículo coletor, tal informação se torna imprescindível, uma

vez que o veículo é obrigado a seguir o sentido do trânsito.

Para fins de comparação foram criadas então três matrizes distintas, todas compostas pelos 20 pontos obtidos, relacionando a distância entre cada esquina da região até as esquinas próximas. Uma vez construídas essas matrizes de distâncias, foi implementado o algoritmo matricial de Floyd (GRACIOLLI, 1994) para a obtenção do caminho mais curto entre todos os pontos das matrizes, bem como a geração de suas respectivas matrizes de precedentes, as quais indicam o caminho correspondente à menor distância entre dois pontos quaisquer da rede.

A primeira matriz foi construída através do cálculo das distâncias euclidianas entre os 20 pontos ótimos, localizados na rede considerada. A segunda matriz foi construída através da eliminação de todos os pontos não selecionados como ótimos, pelo problema das p -medianas, nas matrizes de valor e de precedência que deram origem ao cálculo de localização, formando assim duas matrizes simétricas, compostas por 400 elementos em cada uma,

que estabelecem a distância entre todos os pontos ótimos sem considerar o sentido do tráfego (matriz de valores). Por fim, o mesmo procedimento de eliminação foi aplicado às matrizes de custo e precedentes obtidas, considerando o sentido do trânsito, obtendo-se, assim, uma matriz assimétrica também composta por 400 elementos cada.

Cabe destacar a importância da matriz de precedentes, uma vez que ao apresentar uma solução ótima para o problema de roteamento, o Lingo® determinará somente a seqüência que deverá ser cumprida entre os pontos, cabendo à matriz de precedentes identificar exatamente por quais vias o veículo deverá trafegar até alcançar o próximo ponto de coleta.

3. Resultados obtidos

A formulação foi aplicada a cada uma das três situações descritas. A figura 1 apresenta a rota ótima obtida para a terceira delas, qual seja, a rota que considera o sentido do tráfego (mãos de direção).

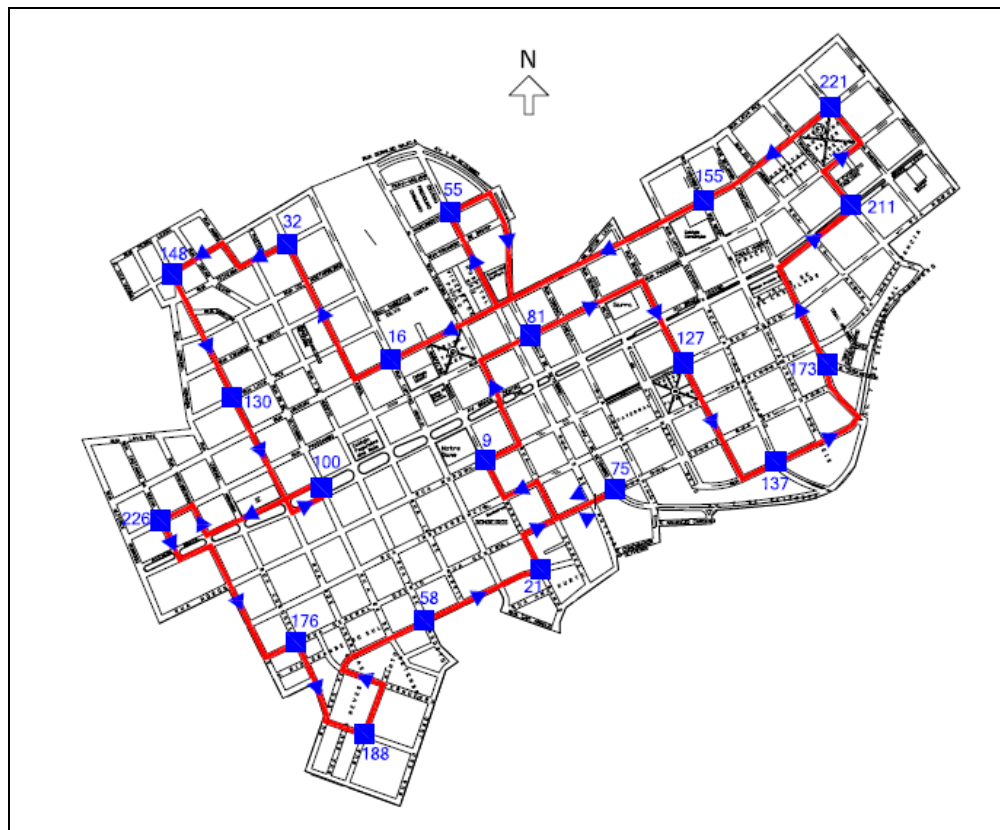


Figura 1 – Rota para veículo coletor considerando sentido do tráfego.

Ao se verificar a exequibilidade desta última rota, notou-se que a solução proposta sugeriria que o veículo coletor executasse uma manobra de retorno, logo após coletar o ponto 75, conforme o detalhe representado na Figura 2.

Apesar de não representar uma movimentação ilegal, tal manobra pode se tornar inviável para um veículo coletor de grande porte.

Assim, foi proposto que o veículo realizasse o contorno continuando pela Rua Sete de Setembro e dobrando à esquerda na Rua Coronel Chicuta, para, então, retomar a Rua General Osório e prosseguir com seu roteiro. Como tal ajuste implica em um aumento na distância total percorrida pelo modelo proposto de 322 metros, o mesmo passou a ser considerado na matriz de distâncias e a formulação mais uma vez foi analisada, dessa vez obtendo-se uma rota ótima totalmente distinta das anteriormente determinadas.

Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 1. É importante ressaltar que todas as rotas propostas apresentam um roteiro circular, partindo e retornando do mesmo ponto (ponto 137). Isso se dá devido ao fato de que o aterro sanitário de onde partem os veículos coletores vazios e retornam cheios está localizado a cerca de 8,5 quilômetros de distância ao sul da área objeto de estudo, devendo então os veículos coletores iniciarem e encerrarem o circuito ótimo pelo ponto de coleta indicado, que se encontra na interseção com a única via de acesso ao aterro sanitário.

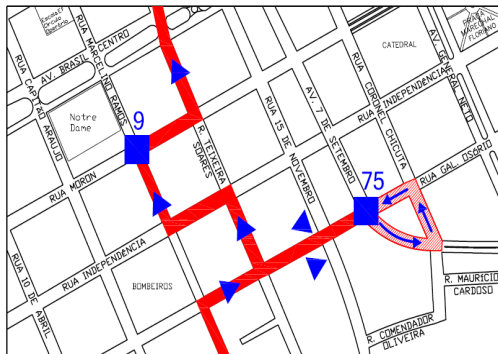


Figura 2 – Detalhe do ponto 75 na rota ótima proposta pelo sentido do tráfego.

Tabela 1 – Resumo das rotas propostas para o problema do caixeiro viajante

Pontos	Euclidiana	Sem Mão	Com Mão	Corrigida
01	137	137	137	137
02	75	127	173	173
03	21	75	211	211
04	58	09	221	221
05	188	21	155	155
06	176	58	55	55
07	100	188	16	81
08	226	176	32	75
09	130	226	148	21
10	148	100	130	58
11	32	130	100	188
12	55	148	226	176
13	16	32	176	226
14	09	16	188	100
15	81	55	58	130
16	127	81	21	148
17	155	155	75	32
18	221	221	09	16
19	211	211	81	09
20	173	173	127	127
01	137	137	137	137
total (m.)	8.881	10.995	11.681	11.796

Ao se comparar as distâncias totais obtidas através da matriz de distâncias euclidianas (8.881 metros) com as distâncias totais obtidas através da matriz simétrica, sem mãos de direção (10.995 metros) pode-se considerar um coeficiente de ajustamento de 1,238 e um coeficiente de 1,328 para a matriz assimétrica, com mãos de direção exequível (11.796 metros), sendo este último bastante próximo do coeficiente de ajustamento aproximado de 1,35 obtido através de regressão linear para áreas urbanas apresentado por Novaes (1989 apud Graciolli, 1994, p.41) e proposto para situações onde as distâncias reais sejam impraticáveis de se obter. Destaca-se, no entanto, que as rotas ótimas não são as mesmas para as situações analisadas uma vez que o coeficiente de ajustamento proposto corrige somente o valor da distância total a ser percorrida pelo veículo.

McDougal (2001) destaca que o aumento no número de contêineres certamente aumentará as taxas de

participação da população e, conseqüentemente, as taxas de recuperação de resíduos, mas por outro lado diminuirá a taxa de retorno sobre a operação uma vez que a quantidade extra coletada diminuirá com cada contêiner extra que é adicionado ao sistema, até que em um determinado ponto, o custo econômico adicional e o passivo ambiental gerados no processo, como o maior consumo de combustível pelo veículo coletor, façam com que esse aumento no número de contêineres venha a exceder os ganhos ambientais desse tipo de coleta diferenciada. Buscando a orientação no sentido de se obter um número ideal de contêineres no sistema que procure o equilíbrio entre os dois custos, procurou-se ampliar o estudo para um número crescente de contêineres, determinando não apenas a distância a ser percorrida pelos usuários, mas também a distância total do percurso efetuado pelo veículo coletor.

Para esse último objetivo, verificou-se que a análise pelo Lingo[®] só se mostrou viável, em termos computacionais, para um limite de 40 facilidades, como demonstra a tabela 2. Os tempos de processamento listados nessa tabela foram obtidos num computador equipado com processador Intel Dual Core T2080 de 1,73 Gigahertz de velocidade e 1 Gigabyte de memória RAM.

A partir das simulações efetuadas observou-se que, uma vez que a área total a ser coberta não muda em função do número de facilidades a serem atendidas, o aumento na distância total a ser percorrida pelo veículo coletor varia de forma pouco significativa com o aumento no número de facilidades.

Tabela 2 – Iterações e tempo de processamento para o PCV no Lingo[®]

No. de Pontos	No. de Iterações	Tempo (hh:mm:ss)
10	346	00:00:01
20	140.861	00:00:17
30	7.157.030	00:19:58
40	338.292.830	17:35:56

4 Conclusões

Com o objetivo de minimizar os impactos ambientais causados por tal atividade, a adoção de programas de coleta

seletiva com separação de resíduos na fonte tem se mostrado uma ferramenta eficiente, mas que depende fortemente da motivação da população em aderir a tais programas. A distância percorrida pelos moradores até os pontos de coleta de resíduos representa um papel primordial nesses esforços de motivação.

Por outro lado, os custos envolvidos na aquisição e distribuição de postos de coleta, bem como os custos envolvidos na atividade de coleta e destinação desses resíduos representam um montante considerável para a administração pública.

O município de Passo Fundo não conta, até o presente, com um sistema efetivo de coleta seletiva. Assim, um dos principais objetivos do estudo desenvolvido consistiu na proposição de um sistema eficiente e de fácil expansão.

A partir da localização ótima dos pontos de coleta, foi aplicada a formulação matemática do clássico problema do caixeiro viajante, em conjunto com as informações de sentido de tráfego das vias que compõem a rede, para se estabelecer uma rota ótima para a coleta desses resíduos, minimizando a distância percorrida pelo veículo coletor entre os pontos da rede.

A definição da rota ótima a ser percorrida pelo veículo coletor foi efetuada para três situações distintas: considerando distâncias euclidianas entre os pontos, percorrendo-se as vias sem considerar o sentido do tráfego e considerando o sentido do tráfego. Constatou-se que a consideração do sentido do tráfego é efetuada de forma relativamente simples e que, caso não seja feita, os resultados obtidos serão pouco significativos, ainda que permitam estimar a distância total a ser percorrida.

Em seguida, realizando investigações através de simulações numéricas, verificou-se que o número de pontos de coleta não influencia de forma significativa a distância total a ser percorrida pelo veículo coletor, uma vez que a área total não varia.

De forma geral, pode se concluir que, quanto maior o número de facilidades, maior será a complexidade do problema e, em conseqüência, a importância, bem como

o ganho relativo decorrente do emprego de técnicas de otimização.

É importante destacar que a construção e aplicação dos modelos aqui apresentados é bastante genérica, e que tais modelos podem ser facilmente adaptados para resolver outros problemas de natureza correlata, mostrando-se extremamente versáteis e úteis para as mais diversas aplicações.

Com o objetivo de aumentar a eficiência do programa de coleta seletiva proposto, pretende-se desenvolver estudos sobre a geração, classificação e quantificação dos resíduos por áreas, ou regiões da cidade, para que os modelos aqui apresentados possam ser recalculados levando em consideração os volumes gerados em cada local para que se calcule quantidade e volume dos contêineres receptores, bem como a capacidade e a periodicidade relativa aos veículos coletores. Busca-se, ainda, a integração com Sistemas de Informações Geográficas, com o objetivo de facilitar a obtenção das matrizes de distâncias.

Referências

M.N. Arenales et al, “Pesquisa operacional para cursos de engenharia”, Elsevier, Rio de Janeiro, 2007.

F.R. Barão, “Problemas de localização e roteamento aplicados na otimização da coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo-RS”. Dissertação de Mestrado, PPGEng - UPF, 2008.

N. Chang, Y.L. Wei, Siting recycling drop-o stations in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modeling, *Fuzzy Sets and Systems*, v.114, pp. 133-149, (2000).

N.P. Cheremisinoff, “Handbook of solid waste management and waste minimization technologies”, Butterworth Heinemann, Amsterdam, 2003.

M.C. Goldberg e H.P. Luna, “Otimização combinatória e programação linear”, Elsevier, Rio de Janeiro, 2005.

O.D. Gracioli, “Otimização de roteiros de veículos coletores de resíduos sólidos de serviços de saúde”. Dissertação de Mestrado, EPS - UFSC, 1994.

F.R. McDougall, “Integrated solid waste management: a life cycle inventory”, 2nd ed, Blackwell Science, Oxford, 2001.

S.G. Mohd et al, Mathematical model for optimal development and transportation of recycled waste materials, *Environmental Informatics Archives*, v. 2, n. 2, pp. 233-241, (2004).

A.J. Morrissey, J. Browne, Waste Management models and their application to sustainable waste management, *Waste Management*, v.24, pp. 297-308, (2004).