III-175 - ARRANJOS TERRITORIAIS ÓTIMOS PARA SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE EMBALAGENS PÓS-CONSUMO

Maria Claudia Lima Couto[(1)]
Engenheira Civil e Mestre em engenharia ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Doutora em engenharia sanitária e ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora da Faculdades Integradas Espírito-santenses (FAESA) – Vitória (ES), Brasil.
Liséte Celina Lange
Doutora em Tecnologia Ambiental. Professora Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).
Luciana Alves Rodrigues Macedo
Engenheira Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG. Doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG.
Paula Rogeria Lima Couto
Matemática, Doutora em Modelagem Computacional pelo Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC). Professora adjunta, Departamento de Matemática Aplicada (DMA) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Departamento de Matemática da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Endereço[(1)]**:** Rua Dionísio Rosendo nº 125 – Centro - Vitória – ES - CEP: 29010-100 – Brasil - Tel: +55 (27) 3014-3003 - Cel: +55 (27) 98141-1875 - e-mail: mariaclaudial@gmail.com./ mariaclaudia@valoresambientais.com.br.

RESUMO

O crescimento acelerado do consumo tem levado ao aumento do descarte de produtos no final de vida útil e das embalagens que os acondicionam. A destinação final dessas embalagens e dos produtos pós-consumo geram custos que, na grande maioria dos casos são arcados pelo poder público municipal, responsável legal, no Brasil, pelo gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos. Objetivando a redução dos custos para os municípios, muitos países têm adotado, como solução, a obrigatoriedade da responsabilidade estendida para os fabricantes e importadores por meio da Logística Reversa (LR). A implantação de Sistemas de Logística Reversa (SLR) de produtos pós-consumo propicia benefícios ambientais e econômicos, visto que aumenta o potencial da reciclagem. Entretanto, observa-se que ainda há dificuldades para viabilizar a implantação e a consolidação de SLR. Dentre as lacunas existentes, destacam-se os altos custos e a baixa expectativa de universalização da LR. Os SLR atendem prioritariamente os grandes centros urbanos devido à alta taxa de retorno de materiais. Nesta Tese é apresentado um modelo matemático de localização de instalações destinadas à logística reversa de embalagens pós-consumo, com alocação de Centros de Triagem (CT) e Centrais de Valorização (CV) com a finalidade de formar Arranjos Territoriais Ótimos que permitam a incorporação de municípios de pequeno e médio porte. O problema de otimização gerado objetivou alocar os CT e as CV mais estratégicas e os melhores fluxos entres os nós da rede logística, de forma a minimizar os custos do SLR e maximizar as receitas obtidas com a comercialização dos materiais recicláveis. O modelo foi aplicado ao caso do estado do Espírito Santo, localizado na região Sudeste do Brasil, usando dados reais obtidos em uma pesquisa de campo. Para a análise de sensibilidade do modelo, foram construídos cenários baseados na participação da população e em critérios operacionais como a capacidade produtiva dos CT e CV, os custos de transporte e os valores de comercialização dos materiais recicláveis. Os resultados mostraram que a otimização por meio do modelo logístico desenvolvido pode levar a resultados em que a taxa de Receita/Custo seja superior a 100% e que a organização de municípios pode possibilitar a universalização desse serviço à população, com atendimento aos municípios de pequeno e médio porte, obtendo receitas que justifiquem os investimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos, gerenciamento, logística reversa, embalagens pós-consumo.

INTRODUÇÃO

As questões relacionadas à gestão e ao gerenciamento adequado dos Resíduos Sólidos (RS) têm se tornado, cada vez mais, objeto de estudos científicos, bem como de políticas públicas, em quase todo o mundo. De maneira complementar, com as exigências cada vez mais crescentes dos consumidores e do poder público, aumentam as pressões sobre os fabricantes e os importadores para a redução da quantidade de resíduos de embalagens e para a necessidade de que suas responsabilidades sejam expandidas para os produtos no final da sua vida útil.

A Logística Reversa (LR) inclui questões relacionadas ao processo de planejamento, implementação e controle eficiente e eficaz do fluxo de entrada e armazenamento de bens secundários e de informações, nas cadeias de suprimentos inversas às tradicionais. Tem a finalidade de recuperar valor e propiciar a destinação adequada para produtos pós-venda, pós-consumo e embalagens, desde as fases de produção, distribuição e consumo (FLEISCHMANN *et al*., 2001; TIBBEN-LEMBKE e ROGERS, 2002; RUBIO *et al*., 2008).

As motivações para realização da LR por parte das empresas, em geral, estão fundamentadas em três eixos: ambiental, financeiro e legal. A motivação ambiental surge principalmente quando se observa uma vantagem competitiva através da criação de uma "imagem verde" para os produtos e serviços que são oferecidos ao mercado (SROUFE *et al.*, 2000; KLASSEN, 2000). A legislação existente também tem impulsionado o desenvolvimento de SLR, tanto na Europa como no Brasil, levando os setores produtivos a reverem os ciclos de vida de seus produtos e estruturarem SLR. Esse tipo de motivação, em geral, pode levar à operacionalização cooperada entre diferentes elos da cadeia produtiva.

A LR é, portanto, importante como estratégia de negócios sustentáveis e lucrativos. No entanto, existem diversos fatores críticos, internos e externos, que afetam suas atividades inerentes (BARROSO E MACHADO, 2005; ABDULRAHMANA *et al*., 2014). Dentre as lacunas observadas nos SLR existentes, destaca-se os altos custos e a baixa expectativa de universalização da LR. Os SLR atendem prioritariamente os grandes centros urbanos devido à alta taxa de retorno de materiais.

Objetivando a redução dos custos para os municípios, muitos países tem adotado, como solução, a obrigatoriedade da responsabilidade estendida para os fabricantes e importadores por meio da LR. A implantação de SLR de produtos pós-consumo propicia benefícios ambientais e econômicos, visto que aumenta o potencial da reciclagem. Nesses sistemas, os resíduos são coletados seletivamente e percorrem fluxos diferenciados, o que garante qualidade necessária para serem incorporados a novos processos produtivos. Entretanto, observa-se que ainda há dificuldades para viabilizar a implantação e a consolidação de SLR.

Na legislação brasileira, Lei 12.305/2010 que instituiu no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a responsabilidade de implantar a LR pós-consumo é compartilhada com os elos da cadeia logística. Sendo atribuído ao setor produtivo o dever de gerenciar e custear a destinação adequada das embalagens e dos produtos pós-consumo (BRASIL, 2010).

Segundo a Lei 12.305/2012, a LR é um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios, destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos RS ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu próprio ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

A LR apresenta benefícios ambientais e econômicos, pois reduz as demandas por matérias-primas virgens, além de aumentar o potencial de reciclagem, uma vez que o material coletado seletivamente tem maior valor agregado no mercado de reciclagem. Além disso, existem ainda alguns fatores que fazem com que o tema esteja cada vez mais em evidência, como a evolução da legislação, impondo obrigatoriedades a fabricantes e importadores, a busca pela melhoria na imagem das empresas e as pressões de competitividade do mercado.

No entanto, ainda existe o desinteresse e a dificuldade de uma parte do setor produtivo em implantar a LR. Pois essa atividade é vista como sendo de alto custo, apresentando restrições logísticas diferentes da logística de suprimento tradicional. Além disso, verifica-se a dificuldade das empresas em medirem o impacto efetivo do retorno do produto, visto que, na maioria das vezes, o produto não é inserido no mesmo processo industrial.

No Brasil, a PNRS, Lei 12.305/2010, passou a exigir dos setores produtivos a implantação de Sistema de Logística Reversa (SLR) para alguns produtos. A partir dos novos conceitos contidos nessa lei, inicia-se um novo ciclo de discussões visando à estruturação de SLR, com a necessidade de incorporação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, com atribuições individualizadas e encadeadas entre todos os elos da cadeia produtiva, bem como com responsabilidades para o consumidor e o poder público.

Por outro lado, a Lei traz um importante conceito de que visa ampliar a economia de escala no gerenciamento dos resíduos sólidos por meio de consórcios públicos, com intuito de juntar municípios, principalmente de pequeno e médio porte, garantindo uma quantidade maior de resíduos e, assim diluindo os custos fixos dos sistemas de coleta, transporte e destinação final. Esses consórcios, por sua vez, podem ser constituídos através da conformação de Arranjos Territoriais Ótimos (ATOS).

O conceito de ATOS pode ser aplicado em outras áreas relacionadas aos RS, mesmo que a gestão e operação estejam a cargo do setor empresarial, como os SLR, com o objetivo de ganho de escala.

Portanto, os ATOS relativos à SLR poderão ser uma parte da área de um município grande, ou a área formada por vários municípios pequenos e médios, que produzam resíduos sólidos com potencial de reciclagem, em escala suficiente que possa viabilizar economicamente instalações de Centros de Triagem (CT) e Centrais de Valorização (CV).

Fazem parte dos ATOS os Pontos de Geração (PG) representados pelas sedes municipais, os CT, onde as embalagens são triadas e prensadas, as CV, para onde os materiais são encaminhados depois de saírem dos CT e ficam armazenados temporariamente para aguardar uma oportunidade de comercialização ou recebendo beneficiamento primário. Após saírem das CV os materiais são comercializados junto às Empresas Recicladoras (ER). Os rejeitos do sistema são encaminhados para Aterros Sanitários (AS).

Neste estudo, a modelagem matemática é realizada visando melhorar o retorno financeiro de SLR e garantindo a abrangência de 100% dos municípios. O modelo foi aplicado às embalagens pós-consumo, pois o SLR de embalagens é obrigatório em muitos países, e estes materiais impactam diretamente a população, além de trazerem prejuízos ambientais, econômico e de saúde pública pela sua disposição inadequada. Além disso, as embalagens compõem uma grande parcela de RSU secos, e a base de dados disponível permitiu uma avaliação detalhada do modelo.

O objetivo desse modelo logístico é definir a localização dos CT e das CV, bem como determinar os melhores fluxos entre os nós da rede. Desta forma, o modelo busca minimizar os custos de implantação, de operação e de transporte, além de maximizar as receitas obtidas com a venda dos materiais para as ER. A partir destas alocações, são definidos ATOS para SLR e também a indicação de polos industriais atrativos para indústrias recicladoras se instalem para atender a este novo mercado.

O modelo logístico é um modelado matemático de otimização, cuja abordagem de resolução é a Programação Linear Inteira Mista (PLIM). O modelo é resolvido computacionalmente utilizando o solver IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (IBM, 2015). Para avaliar o modelo desenvolvido, foi realizada uma pesquisa de campo, no estado do Espírito Santo/Brasil. Para avaliar a sensibilidade do modelo, foram construídos cenários considerando condicionantes do modelo e hipóteses, em termos de participação da população e condições operacionais do sistema.

Os resultados deste estudo podem subsidiar as empresa e os órgãos governamentais sobre os parâmetros que influenciam a sustentabilidade de SLR de produtos pós-consumo e fornecendo uma metodologia para tomada de decisão sobre a localização destas instalações e os melhores fluxos reversos, com a inclusão social de catadores e atendendo à população de municípios de pequeno e médio porte e não apenas às dos grandes centros urbanos.

A partir dos cenários construídos para o modelo, estratégias de priorização de ações podem ser definidas com base em critérios científicos, como a melhoria operacional das instalações, transporte e investimentos para ampliar a participação da população. O estudo contribui também para políticas de incentivo à instalação de indústrias recicladoras, indicando locais mais atrativos logisticamente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Desenvolver modelo logístico para localização de Centrais de Triagem e Centros de Valorização destinados à logística reversa de embalagem pós-consumo, visando minimizar os custos de implantação e de operação das instalações, bem como maximizar a receita com a comercialização dos materiais reaproveitáveis, de forma a organizar o espaço estudado em Arranjos Territoriais Ótimos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma base conceitual do modelo logístico;
- Desenvolver um modelo matemático de forma a representar o máximo a realidade;
- Aplicar o modelo matemático considerando os dados obtidos em coleta de campo no estado do Espírito Santos.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada no trabalho foi divindade em duas etapas:

Etapa 1: Construção de Modelo Logístico
Nessa etapa foi construído o modelo logístico para a localização de instalações destinadas à Logística Reversa (LR) de embalagem pós-consumo, sendo constituída por três fases. Foi desenvolvido o modelo matemático, onde os aspectos considerados relevantes na composição de custos para os SLR de embalagens são descritos de forma matemática, bem como as restrições que deverão ser atendidas, visando tornar o modelo próximo à realidade que se deseja representar.

Etapa 3: Aplicação do modelo logístico
Nessa Etapa, foi realizada a aplicação do modelo matemático utilizando os dados de campo coletados no Estado do Espírito Santo como parâmetros do modelo. O modelo matemático foi implementado no solver IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* (IBM, 2015). Utilizando os dados de campo para alimentar o modelo desenvolvido nesta pesquisa, o qual foi tratado como Modelo Otimizado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estudo tem como princípio norteador a proposição de um método para a construção de um SLR para embalagens pós-consumo em ATOS, representado por um agrupamento de municípios de pequeno e médio porte, que propicie uma minimização de custos das instalações necessárias à triagem e aos processamentos de embalagens pós-consumo, bem como dos custos inerentes dos fluxos de transporte desde o gerador até a destinação final. Busca-se também a maximização da receita obtida pela comercialização dos materiais recicláveis a ser realizada pelos catadores de materiais reaproveitáveis.

Considera-se aqui que o SLR é constituído de quatro entidades estratégicas, que serão chamadas de nós da rede: Ponto Gerador (PG), Centros de Triagem (CT), Centrais de Valorização (CV), Empresas Recicladoras (ER) e Aterros Sanitários (AS).

A Figura 1 apresenta um esquema de ATOS para SLR de embalagens, onde as embalagens coletadas nos municípios (PG) serão encaminhadas para CT. Após triagem e prensagem, estes materiais, já separados por tipologias, serão destinados às CV visando uma agregação de valor. Das CV estes materiais seguirão para as ER.

.

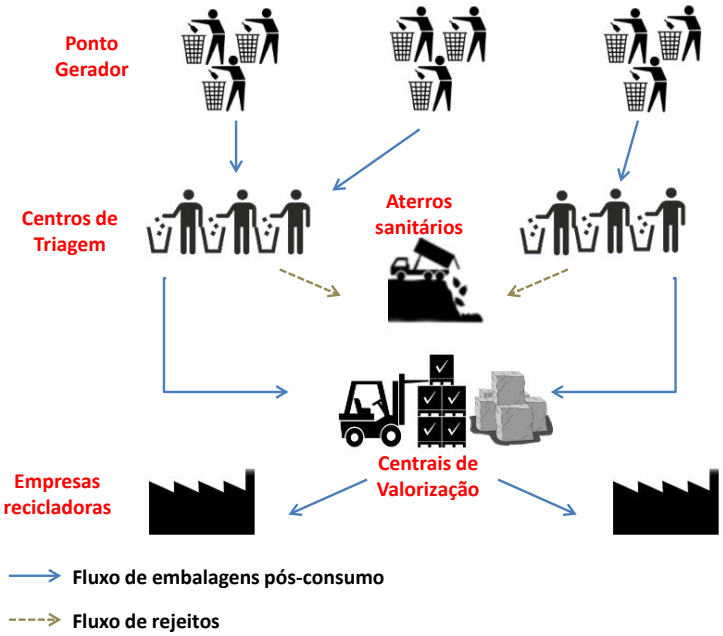


Figura 1: Esquema de Arranjos Territoriais Ótimos para SLR de embalagens pós-consumo.

Este, portanto, é um problema de localização de instalações em uma rede de multicamadas onde se objetiva definir a localização de dois tipos de nós, CT e CV, visando atender à demanda de descarte de embalagens por parte do consumidor (KLOSE e DREXL, 2005; PISHVAEE *et al*., 2010).

MODELO MATEMÁTICO

A função-objetivo do problema de programação linear é composta por cinco parcelas, divididas em 10 subparcelas. Pretende-se minimizar os custos e maximizar as receitas auferidas com a comercialização dos materiais reaproveitáveis. Este problema é descrito pela Equação 1.

$$Minimizar\ CT_{Rede} = \sum_{i\epsilon I}\sum_{c\epsilon C} f_c Y_{ic} + \sum_{m\epsilon M}\sum_{q\epsilon Q} h_q N_{mq} + \sum_{i\epsilon I}\sum_{c\epsilon C} cof_c Y_{ic} + \sum_{m\epsilon M}\sum_{q\epsilon Q} coh_q N_{mq} + \sum_{l\epsilon L}\sum_{i\epsilon I}\sum_{c\epsilon C} df_{li} cf_{li} X_{lic} + \sum_{i\epsilon I}\sum_{c\epsilon C}\sum_{m\epsilon M}\sum_{q\epsilon Q}\sum_{g\epsilon G} ds_{im} cs_{im} Z_{icmqg} + \sum_{m\epsilon M}\sum_{q\epsilon Q}\sum_{j\epsilon J}\sum_{g\epsilon G} dh_{mj} ch_{mj} V_{mqjg} + \sum_{i\epsilon I}\sum_{c\epsilon C}\sum_{k\epsilon K}\sum_{g\epsilon G} dt_{ik} ct_{ik} W_{ickg} + \sum_{i\epsilon I}\sum_{c\epsilon C}\sum_{k\epsilon K}\sum_{g\epsilon G} cd_g W_{ickg} - \sum_{m\epsilon M}\sum_{q\epsilon Q}\sum_{j\epsilon J}\sum_{g\epsilon G} r_g V_{mqjg}.$$

Equação 1

As parcelas que compõem os custos totais das SLR em estudo são formadas pelos custos de instalação e operação das CT e da CV, os custos de transporte entre os nós o custo de destinação de rejeitos e a receita auferida com a comercialização dos materiais.

CONSTRUÇÃO DOS CENÁRIOS

Foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo por meio da construção de cenários. Com a construção dos cenários foi possível avaliar como as alterações sofridas por alguns dados podem provocar alterações no resultado da Função Objetivo. Os cenários foram construídos com base na variação da taxa de retorno das embalagens por parte da população, em aspectos operacionais do sistema como a produtividade da associação de catadores, os custos de transporte e o preço de venda dos materiais para indústrias recicladoras.

Para avaliação do modelo matemático quanto aos aspectos operacionais, foram testados seis cenários. O Cenário 1 é considerado Pessimista, os cenários 2 e 3 são Conservadores e os Cenários 4, 5 e 6 são Otimistas. A Figura 2 apresenta as condicionantes e as hipóteses adotadas para a construção dos mesmos.

Condicionante	Hipóteses 1	Hipóteses 2	Hipóteses 3
Transporte PG-CT	Sem Compactação (Densidade do material de 65Kg/m3 – CAC = 4,61)	Leve compactação (Densidade do material de 120Kg/m3 – CAC = 2,5)	-
Transporte CT – VC e CV – ER	Material prensado com densidade de 200Kg/m3 - CAC = 1,5)	Material prensado com aumento densidade de 300Kg/m3 – CAC= 1)	-
Produtividade CT e CV	200Kg/ homem.dia (CT) 2000Kg/homem.dia (CV)	300Kg/homem.dia (CT) 3000Kg/homem.dia (CV)	-
Preço de Venda	Sem agregação de Valor, valor de venda igual valor atual.	Aumento de 40% do valor atual devido a oportunidade de venda	Beneficiamento de papel e plástico na CV com preço de venda 3 x e 5 x do valor atual

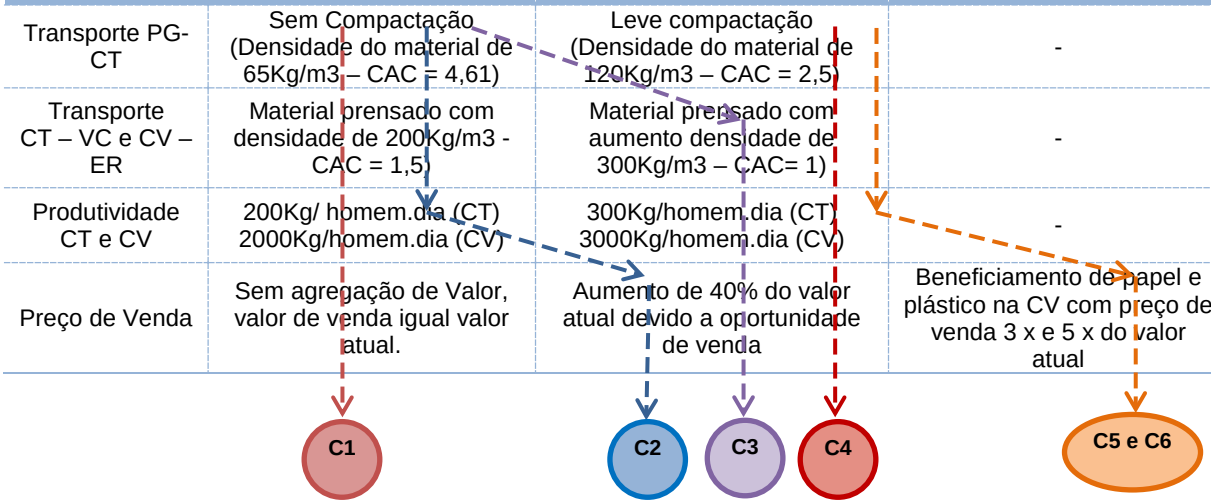


Figura 2: Condições operacionais considerados para a construção de Cenários.

APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

No Modelo Otimizado foram analisados seis cenários relacionados às condições operacionais, sendo que para cada cenário foram analisadas as quatro taxas de retorno, totalizando 24 cenários para o Modelo Otimizado.

Com os resultados do modelo e a informação sobre quais CT e CV foram alocadas e quais fluxos foram estabelecidos entre os nós da rede, foi possível avaliar o comportamento do modelo em função dos cenários propostos. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para o Modelo Otimizado no que se refere aos custos do sistema, às receitas obtidas com a comercialização dos materiais recicláveis, ao lucro bruto do sistema e a taxa receita/custo.

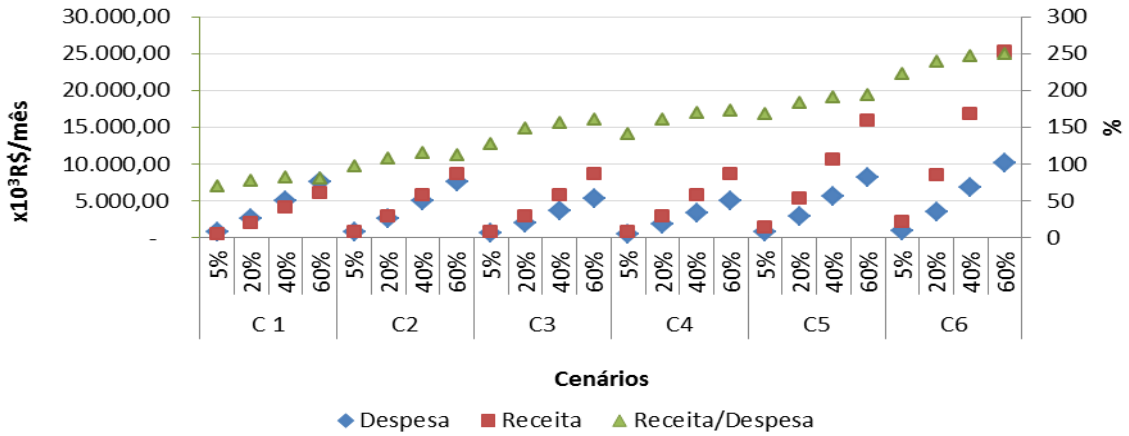


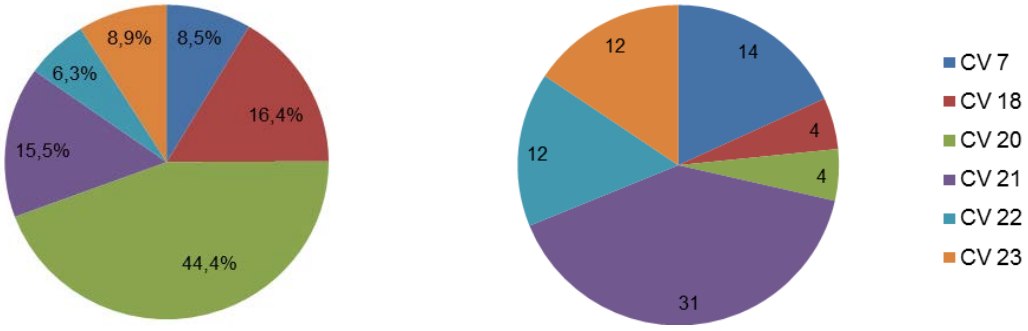
Figura 3: Custos totais e receitas obtidas com a comercialização de materiais reciclados.

A partir dos resultados, verifica-se que a taxa do total de receitas em relação ao total de custos (R/C) torna-se superior a 100% com as melhorias propostas a partir de C2. Ou seja, com a implantação de um SLR em que as CV tenham apenas a função de transbordo, sem agregação de valor aos materiais, a receita não cobre os custos.

O C1 com taxa de retorno de 20% (C1-20%) apresenta hipótese semelhante ao EVTE para embalagens (IBAM, 2012). Neste cenário, apesar dos resultados ainda mostrarem uma taxa de Receita/Custo (R/C) de 77%, o custo unitário de R$ 499,37/t representa uma redução 41,2% quando comparado aos resultados do

EVTE, que apresenta um custo unitário médio de R$849,01/t e com taxa R/C de 55,4% para o Brasil. No EVTE a relação de R/C é ainda mais crítica, 40,1%, para municípios com população inferior a 30 mil habitantes, o que representa 76% dos municípios do ES.

Para uma análise mais detalhada do Modelo Otimizado, foi escolhido o Cenário Conservador C3, com taxa de retorno de 20% (C3-20%), como sendo o mais provável de ser alcançado em médio prazo para o ES. Nesse cenário foram alocadas 6 CV sendo três com Faixa de capacidade 1 (390t/mês), 2 com Faixa 2 (750t/mês) e 1 com Faixa 3 (1950t/mês) de capacidade. As CV alocadas foram: CV 7 em Boa Esperança; CV 18 em Vila Velha; CV 20 em Cariacica; CV 21 em Cachoeiro de Itapemirim; CV 22 em Colatina e CV 23 em Linhares. As CV 18 e 20, localizadas nos municípios de Vila Velha e Cariacica, receberão materiais de oito municípios localizados na RMGV e redondezas, e juntos serão responsáveis por 60,85% das embalagens retornadas pela população. Sendo os 39,15% restantes distribuídos nas demais CV no interior do Estado, como se observa na Figura 4 a e b.



a) Percentual de embalagens recebida b) Total de municípios atendidos

Figura 4: Distribuição das embalagens recicláveis nas CV alocadas – Modelo Otimizado.

A partir da espacialização das CT e CV alocadas, foram constituídos os ATOS para o SLR. São considerados ATOS os agrupamentos de municípios, cuja quantidade de embalagens encaminhadas para o SLR justifique a alocação de CT e CV. Nos ATOS, ações regionalizadas podem ser desenvolvidas, atendendo de forma mais pontual as peculiaridades e as demandas regionais, sejam de aspectos econômicos, sociais ou culturais.

Nos ATOS coexistem municípios de pequeno, médio e grande porte, o que leva às situações distintas em relação ao número de instalações alocadas, ao número de municípios atendidos, e à capacidade requerida para estas instalações. Na Figura 5 é apresentado o mapa do ES organizado em ATOS conforme a alocação de CT e CV resultante do C3–20%.

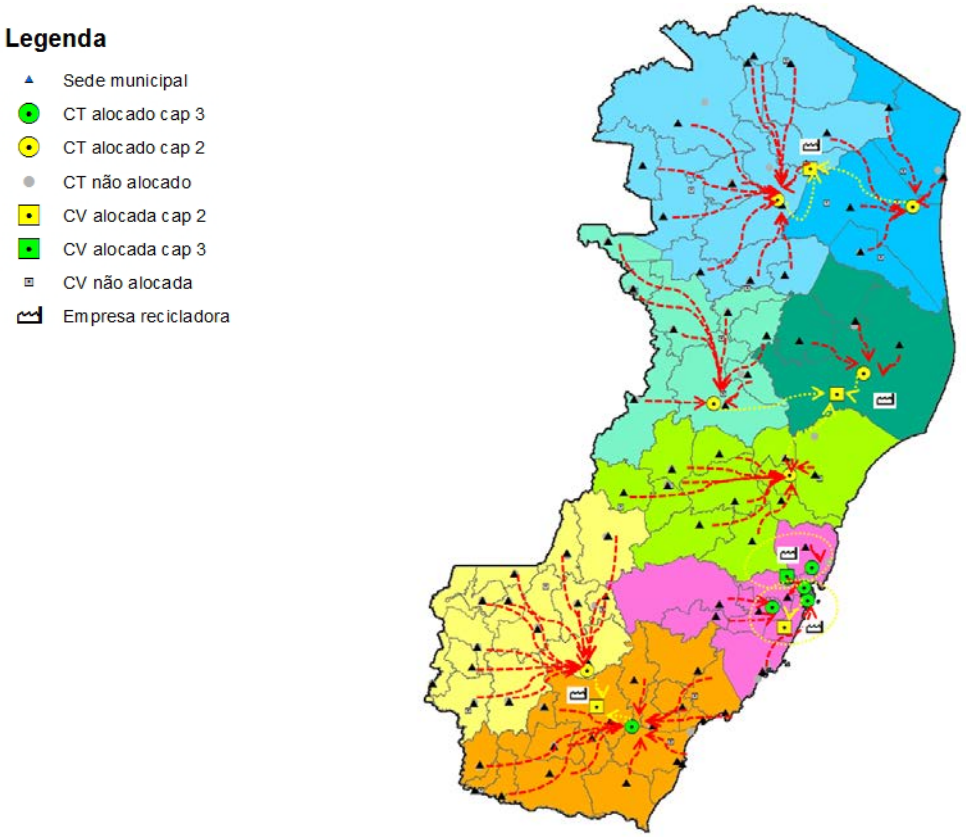


Figura 5: Arranjo territorial ótimo para SLR de embalagens no ES.

CONCLUSÃO

O modelo tem como objetivo principal a localização de instalações destinadas à logística reversa de embalagens, com alocação de CT e CV, permitindo que diferentes tipos de materiais entrem no sistema seguindo fluxos diferentes, em função das restrições das Empresas Recicladoras (ER). A utilização de parâmetros de entrada no modelo a partir de dados reais coletados no estado do Espírito Santo possibilitou uma representação de forma mais fidedigna da realidade e demonstrou a aplicabilidade do Modelo Otimizado proposto.

A comparação do Modelo Otimizado como outras duas situações possíveis de ocorrerem em relação à alocação dos CT e das CV, o Modelo Alternativo e o Modelo Atual, possibilitou ampliar a discussão em termos de sua aplicabilidade, mostrando que a organização de ATOS para SLR de embalagens pode possibilitar a universalização deste serviço à população, com atendimento aos municípios de pequeno e médio porte.

Nos cenários analisados o item que mais contribui para o custo do sistema foram os CT, correspondendo a 58,1%. Em média 93%, destes gastos são relativos aos custos operacionais, visto que o processo atual é totalmente manual, o que requer o uso de muita mão de obra. Portanto, para melhorias no sistema este é um fator importante a ser considerado. O estudo mostrou que a otimização do SLR com a alocação de CV e CT em locais estratégicos reduz os custos totais dos sistemas, o que é evidenciado quando se compara os resultados do C-20%, para todos os três Modelos, com o EVTE de embalagens.

O que deve ser observado é que, com a implementação de melhorias no sistema, principalmente as que refletem na produtividade, a demanda por CT e CV é reduzida, bem como é reduzido o número de postos de trabalho. De forma análoga, havendo um aumento na taxa de retorno, o número de CT e CV podem ser mantidos, desde que haja melhorias na taxa de produtividade nessas instalações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDULRAHMANA, M. D.; GUNASEKARAN, A.; SUBRAMANIAN, N. Critical barriers in implementing reverse logistics in the Chinese manufacturing sectors. *International Journal Of Production Economic*, v.147, p. 460-471, 2014.
2. BARROSO, A. P.; MACHADO, V. H. A Gestão da Logística Reversa dos resíduos em Portugal. *Investigação Operacional*, v. 25, 179-194, 2005.
3. BRASIL. Lei nº. 12.305/ 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União de 03/08/2010*. 2010.
4. FLEISCHMANN, M.; BEULLENS, P.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; VAN WASSENHOVE, L. N. The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operation Management*, v.10, n. 2, p. 156-173, 2001.
5. IBM (2015). Inc. *CPLEX 12.6* User Manual.
6. KLASSEN, R. Exploring the Linkage between investment in manufacturing and environmental technologies. International. *Journal of Operations & Production Management*, v. 20, p.127–147, 2000.
7. KLOSE, A. DREXL, A. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, v. 162, p. 4 –29, 2005.
8. PISHVAEE, M. S.; KIANFAR, K.; KARIMI, B. Reverse logistics network design using simulated annealing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 47, n. 1- 4, p. 269-281, 2010.
9. RUBIO, S.; CHAMORRO, A.; MIRANDA, F.J. Characteristics of the research on reverse logistic (1995-2005). *International Journal of Prod. Research*, v. 46, p. 1099-1120, 2008.
10. SROUFE, R.; CURKOVIC, S.; MONTABON, F.; MELNYK, S. The new product design process and design for environment. Crossing the chasm. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 20, n. 2, p. 267–291, 2000.
11. TIBBEN-LEMBKE, R. S.; ROGERS, D.S. Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management*, v.7, p. 271-282. 2002.