



ISSN: 2447-5580

**MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES NA GESTÃO  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA  
MODELS FOR LOCALIZING FACILITIES IN SOLID WASTE MANAGEMENT:  
A BIBLIOMETRIC REVIEW**

**Giovane Lopes Ferri<sup>1</sup>; Nilza Isabel Matavel<sup>2</sup>; Max Filipe Gonçalves<sup>3</sup>; Glaydston Mattos  
Ribeiro<sup>4</sup>; Gisele de Lorena Diniz Chaves<sup>5</sup>**

- 1 Mestrado em Energia. Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. Lux Energia Solar e Automação, Belo Horizonte, Minas Gerais. giovaneferri@hotmail.com.
- 2 Mestrado em Energia. Universidade Federal do Espírito Santo, 2015. Universidade Federal do Espírito Santo. nilza.matavel@gmail.com.
- 3 Mestrado em Energia. Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, São Paulo. maxfilipe@hotmail.com.
- 4 Pós-doutorado pela HEC-Montréal/Universidade Montréal, 2011. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. glaydston@pet.coppe.ufrj.br.
- 5 Doutorado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de São Carlos, 2009. Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, Espírito Santo. gisele.chaves@ufes.br.

Recebido em: 17/07/2017 - Aprovado em: 18/08/2017 - Disponibilizado em: 30/08/2017

*RESUMO: O artigo consiste em uma revisão bibliométrica sobre a aplicação dos modelos de localização de facilidades na gestão de resíduos sólidos. Realizou-se uma análise no setor de resíduos sólidos com objetivo de identificar as facilidades que normalmente são necessárias abrir (centros de coleta de resíduos, centros de triagem, aterros sanitários, incineradoras), um levantamento das publicações que fazem referência à aplicação dos modelos de localização de facilidades no segmento, assim como identificar os modelos usados e classificá-los para análise. Feito isso, foram identificados os métodos de resolução mais utilizados. Os resultados demonstram uma predominância dos problemas de Programação Linear Inteira Mista, sendo que a aplicação de algoritmos heurísticos foi o principal método de solução. Os modelos matemáticos aplicados na solução de problemas com resíduos sólidos têm evoluído para incorporar objetivos múltiplos, mas poucos têm abordagem dinâmica.*  
*PALAVRAS-CHAVE: Gestão de resíduos. Localização de facilidade. Modelos de problemas de localização.*

*ABSTRACT: The paper consists of a bibliometric review concerning the application of facility location models in solid waste management. We conducted an analysis in the solid waste sector in order to identify the facilities that are normally required to open (waste collection centers, sorting centers, landfills, incinerators), a survey of publications that refer to the application of facility location models in the sector. It would also identified the models used and classified them for analysis. Then, the most widely used resolution methods were identified. The results showed a predominance of Programming Mixed Integer Linear problems, while it was found the application of heuristic algorithmic as solution methods. The mathematical models applied to solving solid waste problems have evolved to incorporate multiple objectives, but few have a dynamic approach.*  
*KEYWORDS: Waste management. Facility location. Location problems.*

## INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos (RS) são definidos como todo material sólido ou semissólido indesejável, descartados diariamente resultante das atividades humanas (IBAM, 2001). No decorrer dos processos da industrialização e urbanização, o homem vem consumindo cada vez mais, recursos naturais para atender as suas necessidades. Contudo, quanto maior é o consumo, maior é a geração de resíduos sólidos.

Segundo o World Bank (2012), a produção mundial de resíduos sólidos de 2012 foi de 1,3 bilhões de toneladas, sendo que se o ritmo de produção continuar assim, em 2025 essa quantidade aumentará para 2,2 bilhões de toneladas, representando um aumento no custo anual de gestão de cerca de 205 bilhões para 375 bilhões dólares. Com isto, percebe-se que a problemática dos resíduos sólidos é de extrema relevância na atualidade, constando na pauta dos assuntos mais discutidos no nível das Nações Unidas e de outras agências de desenvolvimento internacionais e, por isso, merece atenção e gestão por parte da sociedade, com especial atenção para as autoridades municipais.

A disposição inadequada dos resíduos sólidos acarretou a formação dos vazadouros a céu aberto, popularmente conhecidos como lixões, caracterizados pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública, causando impactos socioambientais (BESEN et al., 2010).

Para evitar este problema, a legislação vigente visa desenvolver a gestão adequada dos resíduos sólidos. De um modo geral, a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (GIRS) pode ser definida como, um conjunto de procedimentos de gestão, administração e planejamento que envolve os diferentes atores de uma

sociedade, e visa minimizar a geração e os efeitos negativos dos resíduos sólidos, proporcionando sempre aos resíduos um destino adequado (IBAM, 2001). Portanto, a gestão de resíduos deixou de ser vista apenas como ações de coleta e deposição de resíduos, e passou a ser analisada como um processo integrado, com um forte componente econômico e social, cujos objetivos centrais são minimizar a produção dos resíduos e maximizar o seu reaproveitamento.

A gestão integrada dos resíduos sólidos contém iniciativas que visam a valorização dos resíduos (IBAM, 2001; UNEP 2005). Por essa razão, a operacionalização eficaz da GIRS está condicionada pela abertura e localização de infraestruturas logísticas, que sirvam de instalações para centros de coleta, centros de triagem, aterros sanitários e empresas de reciclagem (UNEP, 2005). A decisão da abertura e localização destas infraestruturas é de natureza estratégica, uma vez que representam altos investimentos envolvidos e profundos impactos sobre os custos logísticos de todo processo.

Desde a década de 70, a determinação espacial destas infraestruturas logísticas vem sendo estudada como problema de localização de facilidades pela Pesquisa Operacional (PO) (WALKER et al., 1974). Na área da pesquisa operacional o problema de localização de facilidades trata de decisões sobre onde fixar infraestrutura em uma rede, considerando que existem clientes a serem atendidos, de forma a otimizar um determinado critério (OWEN; DASKIN, 1998; BALLOU, 2001; MELO et al., 2009; FARAHANI et al., 2010).

A literatura indica vários exemplos da aplicabilidade dos métodos de PO na localização de infraestruturas físicas tanto como setor público como privado (GALVÃO, 2004; LORENA, 2003; EISELT;

MARIANOV, 2014). Uma vasta variedade de modelos matemáticos para representar os problemas de localização e, assim, solucioná-los tem sido desenvolvida (DASKIN, 2008; OWEN; DASKIN, 1998; PIZZOLATO et al., 2012).

Contudo na área específica de resíduos sólidos, a divulgação de pesquisas sobre localização de facilidades demonstra-se ainda dispersa. Devido a diversidade dos modelos de localização de facilidades existentes na literatura e a importância de abertura de facilidades na gestão de resíduos sólidos no cenário atual, é relevante efetuar um levantamento e análise dos modelos mais usados no setor dos resíduos sólidos. Portanto, este artigo pretende fazer um levantamento das características mais comuns empregadas nesta área.

O conteúdo do artigo está estruturado, além desta introdução, em 5 seções além das referências. A seção 2 aborda a revisão bibliográfica sobre os modelos de localização de facilidades. Na seção 3 encontra-se a metodologia que expõe os procedimentos metodológicos usados na pesquisa. A seção 4 é composta pelos resultados da pesquisa e uma discussão. Na seção 5 são dadas as considerações finais do artigo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO

O problema da localização preocupa-se em estudar uma área específica a partir das unidades de distribuição de produtos ou de prestação de serviços, o objetivo destes problemas é determinar a quantidade e a localização ideal destas unidades de forma a atender da melhor maneira possível um conjunto de usuários cuja localização é conhecida (EISELT; MARIANOV, 2013).

A literatura indica que as pesquisas, sobre problemas de localização tiveram a sua origem por volta da década de 60, com os trabalhos do advogado e matemático Pierre de Fermat. Mais tarde nos anos 90, pesquisadores como Alfred Weber contribuíram com desenvolvimento da teoria da localização das indústrias, e Weisfeld com a ideia dos procedimentos iterativos para a localização de uma nova facilidade para minimizar a soma dos pesos das distâncias euclidianas para um número existente de facilidades (BARÃO et al., 2009).

Na área da pesquisa operacional o problema de localização de facilidades trata de decisões sobre onde localizar facilidades em uma rede, considerando que existem clientes a serem atendidos, de forma a otimizar um determinado critério (OWEN; DASKIN, 1998; BALLOU, 2001; MELO et al., 2009; FARAHANI et al., 2010; FERRI et al., 2013). O termo facilidades pode se referir a fábricas, depósitos, escolas, etc., enquanto clientes pode se referir a depósitos, unidades de vendas, estudantes, etc.

Por estar associada ao planejamento estratégico, a localização de facilidades vem sendo utilizada tanto no setor público, quanto no setor privado (GALVÃO, 1981; OWEN; DASKIN, 2008; LORENA, 2003). No setor público, o estudo de localização é normalmente realizado na instalação física de facilidades provedoras de serviços públicos de maneira a favorecer a população e atrair atividade econômica às cidades, como por exemplo, escolas, postos de saúde, corpo de bombeiros, centrais de ambulâncias, viaturas de polícia, pontos de ônibus, etc. No setor privado, o estudo é aplicado nas instalações de facilidades capazes de garantir maior competitividade de mercado para as empresas, como por exemplo, fábricas, armazéns, depósitos, torres de transmissão, lojas de franquias (OWEN; DASKIN, 1998; BALLOU, 2001).

A área da pesquisa operacional vem desenvolvendo uma enorme variedade de modelos matemáticos para representar os problemas de localização e assim solucioná-los (DASKIN, 2008; OWEN; DASKIN, 1998; GALVÃO et al., 1999; BALLOU, 2001; PIZZOLATO et al., 2012).

## 2.2 MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES

A literatura apresenta diferentes taxonomias para a classificação dos modelos de localização de facilidades (KLOSE; DREXL, 2005; BALLOU 2001; DASKIN, 2008; FARAHANI et al., 2010). Os pesquisadores Klose e Drexl (2005) consideram que os modelos de localização podem ser classificados em função de diversos aspectos específicos como, a região geográfica, os objetivos, a capacidade da facilidade, a quantidade de estágios, a quantidade de produtos e serviços, a influência de demanda, e ao dinamismo.

Já Daskin (2008) explica que, os modelos devem ser classificados em função do espaço em que os problemas são modelados, e sugere uma taxonomia baseada em 4 de modelos de localização: (1) modelos analíticos, são considerados os mais simples, assumem que a demanda é distribuída de maneira uniforme ao longo de uma área de serviço e que as instalações podem estar localizadas em qualquer lugar dentro da área, o seu método de resolução é com base em cálculos ou técnicas simples; (2) modelos contínuos, assumem que as demandas surgem em pontos discretos, o seu método de resolução é com base em procedimentos numéricos integrados como algoritmos; (3) modelos de rede, assumem que as demandas surgem e as instalações podem ser localizadas apenas em redes compostas por nós e ligações, o seu método de resolução é estruturado em

redes e árvores; (4) modelos discretos, as demandas geralmente surgem sobre os nós e as instalações estão restritas a um conjunto finito de localizações candidatas, o seu método de resolução é com base em algoritmos, programação linear.

Por sua vez, Farahani et al., (2010) defendem que esses modelos ainda podem também ser distinguidos quanto a quantidade de critérios e objetivos a serem otimizados. Existem, deste modo, os (1) modelos com um único objetivo, que buscam encontrar solução apenas para um objetivo, por exemplo minimizar o custo total associado à instalação das facilidades e ao transporte realizado entre as mesmas e os pontos de demanda; e (2) modelos multiobjectivos que visam encontrar uma solução para vários objetivos em simultâneo, exemplo trabalhar com múltiplos objetivos ao mesmo tempo como minimizar o custo total, minimizar os riscos ambientais, maximizar a demanda coberta, e maximizar o nível de serviço (FARAHANI et al., 2010).

Serão apresentados os modelos de localização considerados clássicos na literatura, por constituírem a base da maioria dos problemas de localização de facilidades. Dos modelos que serão apresentados, será dada uma ênfase aos modelos p-Mediana por serem de interesse deste artigo. A literatura demonstra que a grande maioria dos problemas de localização de facilidades para gestão de resíduos sólidos, é feita com base nos problemas p-Mediana e suas variações (RAMOS-FILHO, 2005; FIGUEREDO; MAYERLE, 2008; ARRUDA et al., 2010; FERRI et al., 2013). Pois estes descrevem um problema (p-Mediana) que visa determinar a configuração de custo mínimo de instalação de facilidades e de atendimento da demanda de cada cliente em uma rede conectada por um número finito de caminhos (DASKIN, 2008).

Pode-se dizer que existem modelos clássicos de localização utilizados para diferentes tipos de

problema, ou seja, diante de características específicas, os modelos são direcionados para uso, ou aproveita-se de uma base para aprimorá-los (DASKIN, 2008). Os modelos mais descritos na literatura são: Modelo de Cobertura, Modelo p-Centro e Modelo p-Mediana.

A fim de ilustrar o dinamismo de uma modelagem matemática, o modelo de p-Mediana ocupa-se dos problemas que consistem em localizar p facilidades em uma rede, de modo a minimizar a soma das distâncias de cada vértice de demanda à sua mediana mais próxima (DASKIN, 2008; GALVÃO, 2004; LORENA 2003; SENNE et al., 2005 PIZZOLATO et al., 2012). É considerado um dos modelos de localização mais populares da literatura (LORENA 2003; GALVÃO, 2004). A formulação do modelo sugerida por Senne e outros (2005) é representada da seguinte maneira:

Minimizar:

$$v(PLp - Med) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} y_{ij}$$

Sujeito à:

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

$$\sum_{i \in I} x_i = p \quad (3)$$

$$y_{ij} \leq x_i, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

onde:  $d_{ij}$  = distância entre o ponto de demanda  $j \in J$  e a facilidade  $i \in I$ ;  $p$  indica o número de facilidades necessárias localizar;  $y_{ij} = 1$  indica que o ponto de demanda  $j \in J$  é atendido pela a facilidade  $i \in I$ , e  $y_{ij} = 0$  caso contrário; e  $x_j = 1$  se uma facilidade é aberta em  $j \in J$ , e  $x_j = 0$  caso contrário.

Em que, (1) representa a função objetivo que visa minimizar o custo total entre um ponto de demanda e a facilidade mais próxima; (2) representa a restrição que garante que cada ponto de demanda  $j \in J$  será alocado a uma facilidade  $i \in I$ ; (3) representa a restrição que assegura que p facilidades sejam selecionadas; (4) representa a restrição que assegura que uma alocação será obtida entre um ponto de demanda  $j \in J$  e uma facilidade  $i \in I$ , se uma facilidade for aberta em  $i$ ; (5) e (6) representam as restrições que estão associadas ao domínio das variáveis.

Os modelos p-Mediana apresentam várias variantes, das quais as mais comuns na literatura são modelo p-Mediana capacitado e modelo p-Mediana não capacitado. A diferença entre estes dois modelos está no fato de que, no modelo p-Mediana capacitado as instalações que precisam ser localizadas são capacitadas, existe uma demanda e restrição de capacidade a ser atendida, enquanto no modelo p-Mediana não capacitado as instalações que precisam (1) de ser localizadas não são capacitadas, não existem restrições de capacidade. Estes modelos são relevantes para o projeto de serviços logísticos e distribuição de cargas (BACELOS et al., 2004; GALVÃO 2004; MAPA, 2007; PIZZOLATO et al., 2012).

Arruda e outros (2010) aplicaram a programação linear na formulação do problema de localização de facilidades capacitado e resolveram-no em Solver. O objetivo da pesquisa era criar uma localização otimizada para as estações de tratamento primário do Óleo Residual de Fritura (ORF) de modo que este abastecesse a indústria de biodiesel da cidade de Fortaleza. A determinação da localização das infraestruturas logísticas foi efetuada considerando o volume de OFR gerado em cada bairro, a localização das associações de catadores de materiais reciclados, a capacidade de tratamento primário da usina, e a

distância entre as associações de catadores. Verifica-se que esta pesquisa demonstra a funcionalidade da aplicação dos problemas de localização de facilidades e na localização de facilidades logísticas ao longo da rede logística reversa do ORF.

Os problemas localização de facilidades complexos como os p-Mediana podem também ser tratados, com recurso aos sistemas de informação geográfica (SIGs), levando-se em conta várias informações espaciais e socioeconômicas (CHURCH, 2002; LORENA, 2003). Por exemplo, Barcelos e outros, (2004), realizaram um estudo de localização de escolas públicas na cidade de vitória utilizando um SIGs e o modelo das p-Mediana. Mapa e Lima (2012) realizaram uma pesquisa sobre o uso combinado de SIGs para transportes e a PLIM em problemas de localização de instalações. O objetivo da pesquisa era avaliar a qualidade das soluções geradas pela integração das duas metodologias. Os autores obtiveram vários cenários em que foi possível analisar o desempenho e aplicabilidade de cada um dos métodos.

Vários autores vêm estruturando os problemas de localização de facilidades associadas a gestão de resíduos sólidos no Brasil, com problemas p-Mediana e suas variantes (RAMOS-FILHO, 2005; FIGUEREDO; MAYERLE, 2008; FERRI et al, 2013).

Ramos-Filho (2005) realizou um estudo para localizar um conjunto de centros de coleta de materiais inservíveis, para fins de reciclagem ou disposição final, de forma a atender metas de coleta pré-estabelecidas, por parte da empresa responsável pelo processo reverso de pneus. O problema da localização dos centros de coleta foi estruturado com base no modelo p-Mediana e foi resolvido por intermédio do algoritmo aproximado de Teitz e Bart.

Figueredo e Mayerle (2008) recorreram também ao problema p-Mediana para estruturar o problema de

localização de facilidade no desenho de uma rede reversa logística. Os autores apresentaram uma estrutura conceitual, um modelo analítico e uma solução baseada em algoritmo para o problema do desenho de uma rede para coleta e transporte de produtos para centros de reciclagem.

Ferri e outros (2013) estudaram a localização de facilidades para a gestão de resíduos sólidos urbanos. Os autores estruturaram o problema de localização de centros de armazenamento e triagem de resíduos sólidos urbanos com base em uma variante do problema p-Mediana que foi resolvido pela Programação Linear Inteira Mista.

### 3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos usados foram baseados em um método científico dedutivo e um objeto de estudo descritivo. O procedimento técnico de pesquisa adotado foi a bibliometria, uma ferramenta quantitativa que minimiza a subjetividade inerente na indexação e recuperação de informações, por meio de vários indicadores. A literatura demonstra a relevância da bibliometria como método para obtenção de indicadores de avaliação da produção científica (ELLEGAARD; WALLIN, 2015).

Para atingir o objetivo proposto, realizou-se a coleta de artigos nacionais e internacionais na base de dados da Capes no período 1970 – 2015. A escolha deste período justifica-se, pois as primeiras publicações referentes aos modelos de facilidade em geral datam dos anos 70. Além disso, um dos objetivos do artigo baseia-se na análise do nível de ascensão no número publicações referentes a aplicação dos modelos de localização na gestão de resíduos sólidos.

Para pesquisa dos artigos foram usadas as seguintes palavras-chaves: *facility location, location model* e

*solid waste management*. A utilização de tais termos em inglês justifica-se, pois existe um maior número de publicações em língua inglesa, comparada a portuguesa no campo da área de estudo. Objetivou-se, também, avaliar artigos com maior abrangência internacional. Contudo, determinados artigos, apesar de apresentarem alguma das palavras-chave, foram excluídos da amostra da pesquisa por não terem como tema específico da área que se pretendia estudar. No total foram catalogados para este estudo 41 artigos. O critério de seleção pré-estabelecido pelos autores foi baseado, na existência de localização e/ou abertura de facilidades como tomada de decisão na gestão do setor de resíduos sólidos.

Estes dados foram analisados de forma a identificar a evolução do número de publicações, assim também

como perceber as diferentes abordagens dos problemas de localização no decorrer deste período, verificando o desenvolvimento do conhecimento por meio da complexidade dos modelos propostos para atender à demanda do mercado.

Pishvae e outros (2010) classificaram e codificaram os problemas de desenho de redes logísticas. Baseado neste trabalho, este artigo propôs a classificação em 6 categorias que mostraram-se relevantes para permitir enriquecer os resultados deste trabalho, nomeadamente: Localização geográfica do estudo; Motivação do estudo; Tipo de resíduo estudado; Objetivo principal do modelo; Tipo de programação utilizada; Método de solução utilizado; conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1

Classificação/Taxonomia dos problemas e modelos de localização de facilidades na gestão de resíduos sólidos

Taxonomia	Crítérios	Abreviação
Localização Geográfica	África	AF
	América	AM
	Ásia	AS
	Europa	EU
Motivação	Econômica	ECO
	Legal	LEG
	Social	SOC
	Ambiental	AMB
Tipos de Resíduos	Resíduos Sólidos Gerais	RSG
	Resíduos Volumosos	RV
	Resíduos Eletroeletrônicos	REE
	Resíduos Orgânicos	RO
	Resíduos Perigosos	RP
Objetivo	Minimizar	MIN
	Maximizar	MAX
	Multi-objetivo	MUL
Modelagem	GIS	GIS
	Programação Binária	Bin
	Fuzzy	Fuzzy
	Programação Inteira	Int
	Programação Linear Inteira Mista	PLIM

	Programação Não-Linear Inteira Mista	PNLIM
Método de Solução	Exato	EXA
	Heurístico	HEU
	Heurístico e Exato	HX

Fonte: Elaborado pelos autores

Cada artigo encontrado foi analisado e classificado de acordo com as categorias definidas, como pode ser visto no Quadro 2.

Quadro 2

Classificação dos artigos da pesquisa

Autores	Ano	Local	Motivação	Resíduo	Objetivo	Modelagem	Método Solução
Achillas et al.	2010	EU	LEG	REE	MUL	PLIM	EXA
Alidi	1992	AS	LEG, SOC, AMB	RP	MIN	PLIM	HEU
Alumur e Kara	2007	EU	LEG, SOC, AMB	RP	MUL	PLIM	HX
Aremu et al.	2011	AF	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	FUZZY	EXA
Badran e Hagggar	2006	AF	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	EXA
Barão et al.	2009	AM	LEG	RSG	MIN	Bin	EXA
Benaissa e Benabdelhafid	2010	AF	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	EXA
Bloemhof-Ruwaard et al	1996	EU	ECO, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HX
Caruso et al.	1993	EU	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HEU
Chang et al.	1997	AS	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MUL	FUZZY	EXA
Eiselt e Marianov	2014	AS	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HEU
El-Sayed et al.	2010	AF	ECO, LEG	RSG	MAX	PLIM	EXA
Erkut et al.	2008	EU	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MUL	PLIM	HEU
Ferrell e Hizlan	1997	AM	ECO, LEG	RSG	MIN	Int	HEU
Ferri et al.	2015	AM	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	EXA
Fetter e Rakes	2012	AM	ECO, LEG, SOC, AMB	RV	MIN	PLIM	EXA
Figueiredo e Mayerle	2008	AM	LEG, AMB	RV	MIN	PNLIM	HEU
Fonseca et al.	2010	EU	LEG	RSG	MIN	PLIM	EXA
Galante et al.	2010	EU	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	FUZZY	HEU
Ghiani et al.	2012	EU	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HX
Gomes	2007	EU	SOC, AMB	RV	MIN	GIS	HEU
Gottinger	1986	EU	ECO, LEG	RSG	MIN	PLIM	HEU
Grunow e Gobbi	2009	EU	LEG	REE	MIN	PLIM	EXA
Guo et al.	2008	AM	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HEU
Huang et al.	1997	AS	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HEU
Kannan et al.	2010	AS	ECO, LEG, SOC, AMB	REE	MIN	PLIM	HEU
Karagiannidis et al.	2004	EU	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MUL	PILM	HEU

Kulcar	1996	EU	LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	Int	HEU
Li e Huang	2006	AM	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HEU
Li et al.	2015	AS	LEG, SOC, AMB	RP	MAX	PLIM	HEU
Lu e Bostel	2007	EU	LEG	RSG	MIN	PLIM	HEU
Lyeme	2011	AF	LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HEU
Mitropoulos et al.	2009	EU	LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HX
Nema e Gupta	1999	AS	LEG, SOC, AMB	RP	MIN	PLIM	HEU
Nganda	2007	AF	LEG	RSG	MUL	PLIM	HX
Prawiradinata	2004	AS	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HX
Ramu e Kennedy	1994	AM	ECO, LEG, AMB	RSG	MIN	Bin	HEU
Samanlioglu	2013	AS	LEG, AMB	RP	MIN	PLIM	EXA
Shekdar et al.	1991	AS	LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	Int	HEU
Tralhão et al.	2010	EU	ECO, LEG	RSG	MUL	PLIM	EXA
Walker <i>et al.</i>	1974	AM	ECO, LEG, SOC, AMB	RSG	MIN	PLIM	HEU

Fonte: Elaborado pelos autores

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da amostra indica que o início das publicações sobre modelos de localização na gestão de resíduos sólidos ocorreu nos anos 70, coincidindo com a época do aparecimento das primeiras publicações/pesquisas dos problemas de localização de facilidades no geral. A primeira publicação catalogada neste trabalho, Walker e outros (1974), tinha como objeto decidir o número, tipo, tamanho e localização de facilidades na disposição de resíduos sólidos de Washington – Estados Unidos. O Gráfico 1 apresenta a evolução do número de publicações ao longo do tempo.

Observa-se que o número de publicações começou a aumentar no período dos anos 90, com cerca de 10 artigos publicados, teve um pequeno declínio no

período 2001-2005 (3 artigos publicados), e atinge o seu auge entre 2006-2010 com 18 artigos. A época em que ocorreu o aumento das publicações (1994-1998) coincide com o período pós Rio 92 - Conferência sobre o Meio Ambiente da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, de onde resultou a Agenda 21. Este é um documento estabeleceu um comprometimento das nações para a redução e criação de soluções para os problemas socioambientais. A gestão dos resíduos sólidos foi um dos assuntos em pauta nesse documento, o que conseqüentemente resultou em maior cooperação, integração e aplicabilidade das diferentes ciências nas pesquisas, assim como tomadas de decisões relativas às questões socioambientais.

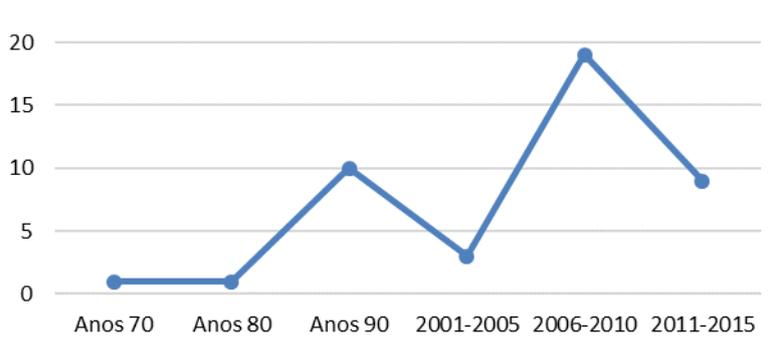


Gráfico 1 - Evolução do número de Publicações

Fonte - Elaborado pelos autores

No período analisado, a região geográfica com maior número de artigos publicados, com base nos critérios de pesquisa utilizados no presente artigo, foi o continente Europeu com 16 publicações. Depois da Europa, segue-se o continente Americano com 9 publicações, da Ásia com 10 publicações e por último

continente Africano com apenas 6 publicações, como demonstra a Figura 1. Vale ressaltar que não foram encontradas publicações referentes aos continentes Oceania e Antártida.

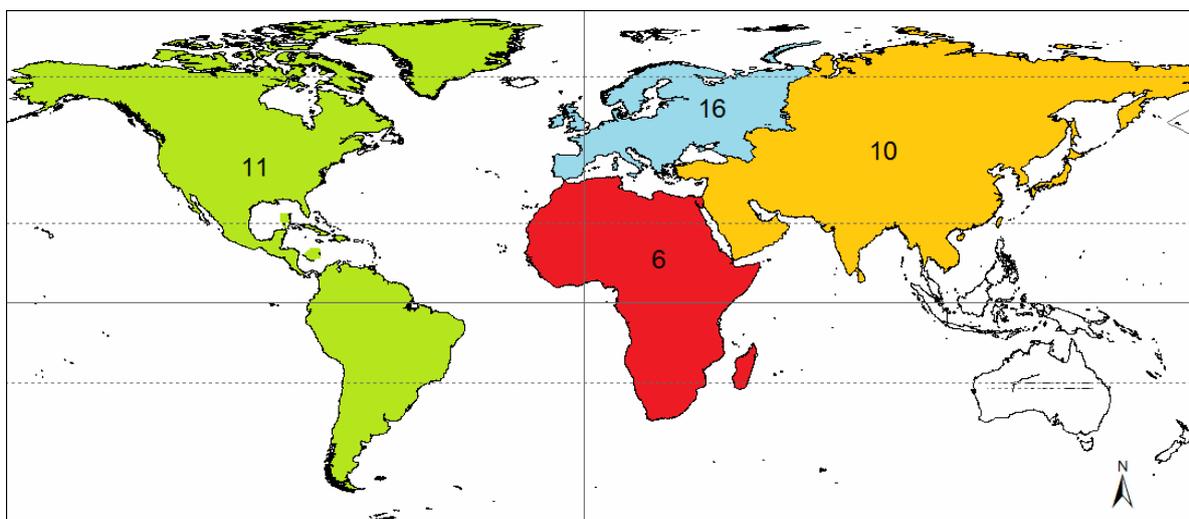


Figura 1 - Evolução do número de Publicações

Fonte - Elaborada pelos autores

Apesar do continente Americano, representado especificamente pelos Estados Unidos ser o pioneiro da teoria de problemas de localização de facilidades, ele apresenta um número bastante reduzido quando comparado ao continente europeu. Esta liderança da Europa é compreensível, quando analisado o seu destacado nível de desenvolvimento socioeconômico,

o seu pioneirismo em estabelecer instrumentos legais regulatórios para a gestão de resíduos, e o seu elevado nível de consciência e comprometimento em relação às questões ambientais. Relacionando ainda as publicações e as regiões geográficas, é importante destacar que nos últimos anos, o número de artigos publicados pelo continente africano aumentou

consideravelmente, evidenciando que a consciência da dimensão de interdisciplinaridade e importância dos modelos de localização de facilidades começa a ser percebido.

Dos fatores motivacionais, os mais apresentados/indicados nas pesquisas foram os fatores legais referidos em 41 artigos (95%) e ambientais referidos em 33 artigos (77%). Em seguida os fatores sociais e econômicos com referências de 30 (70%) e 26 artigos (60%), respectivamente. A superioridade do fator legal realça a eficiência deste aspecto como motivador, demonstrando que a este fator, devido ao seu caráter obrigatório, promove ações na sociedade. Entretanto, ressalta-se a importância da integração da questão legal às outras questões (ambiental, social, econômica) como forma de criar os fatores necessários para a implantação da rede logística reversa sem a necessidade constante de fiscalização ao atendimento normativo.

Quanto ao tipo de resíduo, 30 artigos propuseram facilidades para resíduos sólidos no geral, 5 artigos para resíduos perigosos, 3 artigos para resíduos eletroeletrônicos, 3 artigos para resíduos volumosos, tais como entulho e pneu, conforme Gráfico 3.

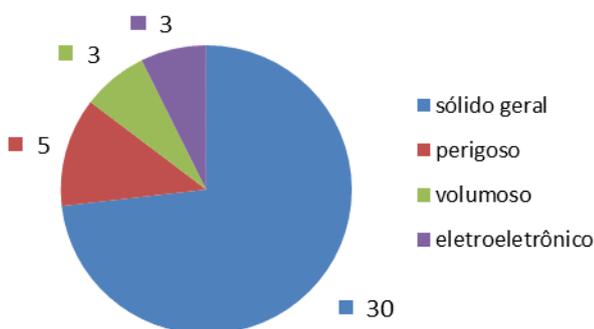


Gráfico 3 – Quantidade de artigos que abordam resíduos específicos

Fonte - Elaborado pelos autores

A definição dos objetivos dos modelos matemáticos adotados nos trabalhos sofreu uma evolução no

período de 1974-1993. Inicialmente os objetivos eram únicos e restritos a minimização, mas com o passar do tempo passaram a tornar-se múltiplos, pois começaram a aparecer artigos com objetivos de minimizar e maximizar em simultâneo. Esse aumento da complexidade dos problemas (exemplo objetivos, restrições, facilidades a abrir) fez com que houvesse também necessidade de criar modelos de localização, modelagem de programação e métodos de solução mais evoluídos e complexos, para acompanhar o nível de exigência dos problemas a serem resolvidos. A maioria dos objetivos encontrada ainda é de minimização (78% dos artigos), uma vez que para o caso de localização de facilidades para resíduos, eles geralmente buscam a minimização de custos totais do sistema, ou até mesmo das distâncias percorridas. Apenas 2 artigos tinham como objetivo a maximização dos resultados e 7 tinham múltiplos objetivos.

Para a modelagem matemática para localização de facilidades para resíduos sólidos, o modelo de programação mais utilizado para descrever a problemática encontrada é a Programação Linear Inteira Mista (PLIM), presente em 31 artigos pesquisados, correspondendo a 77% de todos os artigos, conforme ilustra o Gráfico 4.

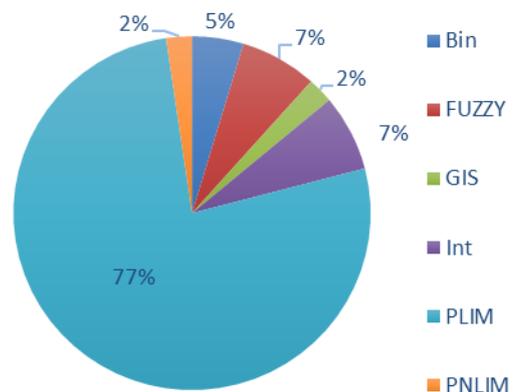


Gráfico 4 - Tipo de programação utilizada nos artigos analisados

Fonte - Elaborado pelos autores

A grande utilização deste método se dá pela combinação de variáveis inteiras e binárias, permitindo que o mesmo problema disponha de soluções tanto referentes a localização dos pontos a serem abertos, quanto a fluxos de quantidades entre diferentes pontos da rede. A utilização da Programação Linear Inteira e da Programação Linear Binária, correspondem a 5 e 7% do total de utilização respectivamente.

Quanto ao método de solução utilizado, os métodos heurísticos possuem um grau de aplicação maior do que os métodos exatos, sendo o primeiro encontrado em 22 artigos e o segundo em 13, conforme Gráfico 5. Esta aplicação pode ser justificada pelo fato de os métodos exatos possuírem limitação de aplicação no que diz respeito ao tamanho do modelo em questão, variáveis e restrições. Além disso, a aplicação de um método não exato pode diminuir os tempos computacionais utilizados para a obtenção da solução satisfatória. Pode se notar ainda que, dentro dos métodos exatos, a utilização do solver CPLEX IBM possui maior representatividade.

Contudo, a utilização e a importância dos métodos exatos podem ser evidenciadas com a sua aplicação para encontrar uma solução ótima. Em 6 artigos da amostra foi utilizada uma combinação entre métodos heurísticos e exatos. Nestes artigos a técnica heurística foi aplicada para gerar uma solução compatível àquela obtida por uma solução ótima.

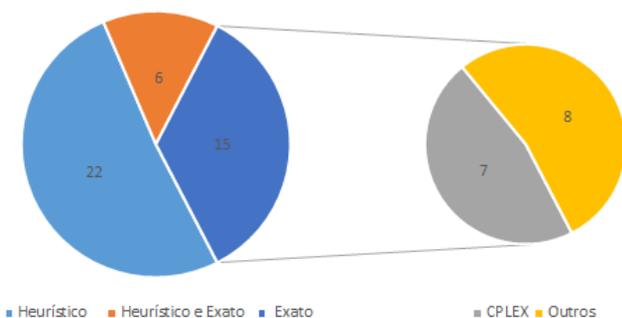


Gráfico 5 - Tipos de métodos de solução empregados nos artigos analisados

Fonte - Elaborado pelos autores

Relativamente às modelagens de programação matemática, as mais usadas foram a Programação Linear Inteira Mista e a Programação Inteira Mista. Contudo, é importante ressaltar que não existe nenhum tipo de programação considerada perfeita, tudo depende da definição do problema e da realidade inserida. Os métodos de solução empregados foram algorítmicos exatos e de aproximação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do trabalho foi identificar os modelos de localização de facilidades mais usados na gestão de resíduos sólidos. Partiu-se do pressuposto que, ao setor de gerenciamento de resíduos sólidos, cabe a responsabilidade de decisão de abrir ou alocar unidades, que servirão de instalações para depósito, coleta, e tratamento de resíduos sólidos, nomeadamente, contentores, centros de coleta, centros de triagem, aterros sanitários, empresa de reciclagem entre outros.

O artigo demonstrou a ascensão do número de publicações nos últimos 40 anos, apontando os impulsionadores da abertura das facilidades no processo de gestão de resíduos sólidos, e finalmente na identificação do tipo de resíduo mais estudado.

A modelagem de programação matemática mais usada foi a Programação Linear Inteira Mista. Além disso, as técnicas de solução mais empregadas foram as heurísticas. Cabe ressaltar que, os métodos exatos possuem grande parcela de utilização.

Como pesquisas futuras, sugere-se que seja feita uma análise mais detalhada relativamente aos modelos de programação matemática e métodos heurísticos

aplicados para resolução dos problemas de localização de facilidades no setor em questão.

Vários trabalhos analisados ressaltaram a importância de estudos de alocação de facilidades para gestão de resíduos sólidos, visto que os gestores públicos, responsáveis por esta atividade, possuem grande dificuldade em desenvolver estas metodologias, principalmente no Brasil. Portanto, a contribuição desta pesquisa consiste em avaliar o estado da arte acerca do tema analisado, reunindo os trabalhos publicados no período e os classificando.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e à Inovação do Espírito Santo (FAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte concedido na forma de bolsas de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ACHILLAS, C.; VLACHOKOSTAS, C.; AIDONIS, D.; MOUSSIOPOULOS, N.; IAKOVOU, E.; BANIAS, G. Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of electrical and electronic equipment. **Waste Management**, v 30, p. 2592–2600, 2010.
- ALIDI, A.S. An integer goal programming model for hazardous waste treatment and disposal. **Applied Mathematical Modelling**, v 16, p.645–651, 1992.
- ALUMUR, S.; KARA, B. Y. A new model for the hazardous waste location-routing problem. **Computers & Operations Research**, v 34, pp1406–1423, 2007.
- AREMU, A. S.; ADELEKE, O. O.; SULE, B. F. A. Gis-based optimization technique for spatial location of municipal waste bins in a developing city. **Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management**, v. 4, n.3, p 65-72, 2011.
- BADRAN, M.F.; EL-HAGGAR, S.M. Optimization of municipal solid waste management in Port Said – Egypt. **Waste Management**, v. 26:534–45, 2006.
- BALLOU, R. H., Unresolved Issues in Supply Chain Network Design. **Information Systems Frontiers**, v. 3, n. 4, p.417-426, 2001.
- BARÃO, F.R.; KRIPKA, M.; KRIPKAR.M.L. Determinação da localização ótima de postos de entrega voluntária para coleta seletiva na região central do município de passo fundo – rs. In **XLISBPO 2009 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento**, p. 1121-1130,2009.
- BENAISSA, M.; BENABDELHAFID, A.A multi-product and multi-period facilitylocation model for reverse logistics. **Polish Journal of Management Studies**, v. 2, 2010.
- BESEN, G. R. et al. Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas. In: SALDIVA P. et al. **Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles**. São Paulo: Ex Libris, 2010.

- BLOEMHOF-RUWAARD, J.M., SALOMON, M.;VAN WASSENHOVE, L.N. The capacitated distribution and waste disposal problem. **European Journal of Operational Research**, v. 88, n. 3, p.490–503, 1996.
- CARUSO, C.; COLORNI, A.; PARUCCINI, M. The regional urban solid waste management system: a modelling approach. **European Journal of Operational Research**, v. 70, p. 16-30. 1993.
- CHANG, N. B.; CHEN, Y. L.; WANG, C. S. F. A fuzzy interval multi objective mixed integer programming approach for the optimal planning of solid waste management systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 89, p. 35-60, 1997.
- DASKIN, M. S. What you should know about location modeling. **Naval Research Logistics**, v. 55, n. 4, p. 283-294, 2008.
- EISELT, H A.; MARIANOV, V. A bi-objective model for the location of landfills for municipal solid waste. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 1, p. 187-194, 2014.
- EL-SAYED, M.; AFIA, N.; EL-KHARBOTLY, A. A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. **Computers & Industrial Engineering**, v.58, p.423-31, 2010.
- ELLEGAARD, O.; WALLIN, J.A. The bibliometric analysis of scholarly production: How great is the impact?, **Scientometrics**, v.105, n.3, p. 1809–1831, 2015.
- ERKUT, E.; KARAGIANNIDIS, A.; PERKOILIDIS, G.; TJANDRA, S.A. A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. **European Journal of Operational Research**, v. 187, p.1402–1421, 2008.
- FARAHANI, R. Z.; STEADIESEIFI, M.; ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: A survey. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, p.1689 – 1709, 2010.
- FERRELL JR, W.G.; HIZLAN, H. South Carolina counties use a mixed-integer programming-based decision support tool for planning municipal solid waste management. **Interfaces**, v. 27, n. 4, p. 23-34, 1997.
- FERRI, G L; CHAVES, G L D; RIBEIRO, G M. Análise e localização de centros de armazenamento e triagem de resíduos sólidos urbanos para a rede de logística reversa: um estudo de caso no município de São Mateus, ES. **Production**, v. 25, n. 1, p. 27-42, 2015.
- FETTER, G.; RAKES, T. Incorporating recycling into post-disaster debris disposal. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 46, p.14-22, 2012.
- FIGUEIREDO, J.N.; MAYERLE, S.M. Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput. **Transportation Research Part E**, v. 44, p.731–752, 2008.
- FONSECA, M.C.; GARCÍA-SÁNCHEZ, A.; ORTEGA-MIER, M.; SALDANHA-DA-GAMA, F.A Stochastic Bi-Objective Location Model for Strategic Reverse Logistics. **TOP**, v. 18, n. 1, p. 158-184, 2010.
- GALANTE, F.; AIELLO, G.; ENEA, M.; PANASCIA, E. A multi-objective approach to solid waste management. **Waste Management**, v. 30, n. 8, p. 1720-1728, 2010.
- GALVÃO, R. D. Uncapacitated Facility Location Problems: Contributions. **Pesquisa Operacional**, v.24, n.1, p.7-38. 2004.

- GHIANI, G.; LAGANÀ, D.; MANNI, E.; TRIKI, C. Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. **Waste Management**, v. 32, n. 7, p. 1291-1296, 2012.
- GOMES, H; RIBEIRO, A B.; LOBO, V. Location model for CCA-treated wood waste remediation units using GIS and clustering methods. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 12, p. 1788-1795, 2007.
- GOTTINGER, H. W. A Computational Model for Solid Waste Management with Application. **Application Mathematical Modelling**, v. 10, n. 3, p. 330-338, 1986.
- GRUNOW, M.; GOBBI, C. Designing the reverse network for WEEE in Denmark. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.58, p. 391–394, 2009.
- GUO, P.; HUANG, G. H.; HE, L. ISMISIP: an inexact stochastic mixed integer linear semi-infinite programming approach for solid waste management and planning under uncertainty. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 22, n. 6, p. 759-775, 2008.
- HUANG, G.G.; HUAICHENG, G.; GUANGMIG, Z. A Mixed Integer Linear Programming Approach for Municipal Solid Waste Management. **Journal of Environmental Sciences**, v. 9, n.4, p. 431 – 445. 1997.
- IBAM. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos** - Gestão Integrada De Resíduos Sólidos. Instituto Brasileiro de Administração Municipal: Rio de Janeiro, 2001.
- JACOBI, P.R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.
- KANNAN, G.; SASIKUMAR, P.; DEVIKA, K. A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, p. 655–670, 2010.
- KARAGIANNIDIS, A.; PERKOULIDIS, G.; MOUSSIOPOULOS, N.; CHRYSOCHOU, M. Facility Location for Solid Waste Management through Compilation and Multicriterial Ranking of Optimal Decentralised Scenarios: A Case Study for the Region of Peloponnesse in Southern Greece. **The Journal of Engineering Research**, v.1, p. 7-18, 2004.
- KULCAR, T. Optimizing solid waste collection in Brussels. **European Journal of Operational Research**, v. 90, n. 1, p. 71-77, 1996.
- LI, Y. P.; HUANG, G. H. An inexact two-stage mixed integer linear programming method for solid waste management in the City of Regina. **Journal of Environmental Management**, v. 81, n. 3, p. 188-209, 2006.
- LI, L.; WANG, S.; LIN, Y.; LIU, W.; CHI, T. A covering model application on Chinese industrial hazardous waste management based on integer program method. **Ecological Indicators**, v. 51, p. 237-243, 2015.
- LORENA, LAN. Análise espacial de redes com aplicações em sistemas de informações geográficas. **Revista Produção (online)**, v. 3, n. 2, 2003.
- LU, Z; BOSTEL, N. Facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. **Computers & Operations Research**, v. 34, p. 299–323, 2004.

- LYEME, H. A. **Optimization of Municipal Solid Waste Management System. A Case of Ilala Municipality, Dar es Salaam.** p 87. Tese (Matemática) - University of Dar es Salaam. 2011.
- MELO, M.T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Facility location and supply chain management – A review. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n 2, p. 401–412, 2009.
- MITROPOULOS, P; GIANNIKOS, I; MITROPOULOS, I. Exact and heuristic approaches for the locational planning of an integrated solid waste management system. **Operational Research**, v. 9, n. 3, p. 329-347, 2009.
- NEMA, A.K., GUPTA, S.K. Optimization of regional hazardous waste management systems: an improved formulation. **Waste Management**, v.19, pp 441-451, 1999.
- NGANDA, M.K. **Mathematical Models in Municipal Solid Waste Management.** 2007. p 72. Tese (Licenciatura). Chalmers University of Technology and Goteborg University. 2007.
- OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. **European Journal of Operational Research**, v.111, p. 423-447, 1998.
- PISHVAEE M.S., FARAHANI, R.Z., DULLAERT, W. A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. **Computers & Operations Research**, v. 3, p 1100-1112, 2010.
- PIZZOLATO, N. D.; RAUPP, F. M. P.; ALZAMORA, G. S. Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da p-Mediana e suas variantes. **Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 4, n.1, p. 13-42, 2012.
- PRAWIRADINATA, R. S. **Integrated solid waste management model: The case of central Ohio district.** p 282. School of The Ohio State University, Ohio, 2004.
- RAMU, N. V.; KENNEDY, W. J. Heuristic Algorithm to Locate Solid-Waste Disposal Site. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 120, n1, p.1-8,1994.
- SAMANLIOGLU, F. A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. **European Journal of Operational Research**, n. 226, p 332–340, 2013.
- SHEKDAR, A.V.; KRISHNASWAMY, K.N.; TIKETAR, V.G.; BHIDE, A.D. Long-term planning for solid waste management in India. **Waste management & research**, v. 9, n. 1, p. 511-523, 1991.
- SOUSA, C.O.M. Política Nacional dos Resíduos Sólidos: uma busca pela redução dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v.7, n.3, p.113-127. 2012.
- TRALHÃO, L.; RODRIGUES, J. C.; ALMEIDA, L. A. A multiobjective modeling approach to locate multi-compartment containers for urban-sorted waste. **Waste Management**, v. 30, p. 2418-2429, 2010.
- UNEP. **SOLID WASTE MANAGEMENT.** 2005. Volume I. Disponível em <<http://www.unep.org/ietc/Portals/136/SWM-Vol1-Part1-Chapters1to3.pdf>>.
- WALKER, W E.; AQUILINA, M; SCHUR, D. **Development and use of a fixed charge**

**programming model for regional solid waste planning.** Rand Corporation, 1974.

WORLD BANK. **WHAT A WASTE- A Global Review of Solid Waste Management.** New York. 2012.