

# Modelo dinâmico de previsão da geração de resíduos sólidos

Fabrizio Berton Zanchi<sup>1\*</sup> , Ana Luisa Santos de Carvalho<sup>2</sup> , Raiane Silva da Cruz<sup>3</sup> , Leonilton Cagy Silva<sup>2</sup> , Rafael Magalhães Pereira<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Centro de Formação em Ciências Ambientais –CFCAM, Campus Sosígenes Costa, Universidade Federal do Sul da Bahia – UFSB Caixa Postal 108, Rod. Porto Seguro-Eunápolis, BR-367, km 10, - Porto Seguro – BA, 45810000.

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais (PPGCTA), Campus Sosígenes Costa, Universidade Federal do Sul da Bahia – UFSB, Caixa Postal 108, Rod. Porto Seguro-Eunápolis, BR-367, km 10, - Porto Seguro – BA, 45810000.

<sup>3</sup> Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro de Formação em Ciências Ambientais –CFCAM, Campus Sosígenes Costa, Universidade Federal do Sul da Bahia – UFSB Caixa Postal 108, Rod. Porto Seguro-Eunápolis, BR-367, km 10, - Porto Seguro – BA, 45810000.

<sup>4</sup> Bacharelado Interdisciplinar em Ciências, Centro de Formação em Ciências Ambientais –CFCAM, Campus Sosígenes Costa, Universidade Federal do Sul da Bahia – UFSB Caixa Postal 108, Rod. Porto Seguro-Eunápolis, BR-367, km 10, - Porto Seguro – BA, 45810000.

\* Autor para correspondência: [fabrizio.berton@csc.ufsb.edu.br](mailto:fabrizio.berton@csc.ufsb.edu.br)

Recebido em 21 de abril de 2020.

Aceito em 14 de dezembro de 2020.

Publicado em 31 de dezembro de 2020.

**Resumo** - Os crescentes desafios quanto ao gerenciamento dos resíduos sólidos (RS) nos municípios e a necessidade da diminuição dos impactos ambientais causados ao meio ambiente vêm impulsionando a busca por estratégias que proporcionem soluções de tais problemas. Dentre estas estratégias está a utilização da modelagem dinâmica de sistemas, que possibilita analisar o comportamento de situações como a geração dos RS em um dado período de tempo. Considerando a necessidade de estudos que corroborem para efetividade na gestão dos RS, este estudo propôs um modelo dinâmico para estimar a geração dos RS e uma rotina para calcular o retorno financeiro dos resíduos reciclados. O modelo foi construído no software STELLA e considerou aspectos como a taxa do incremento populacional, geração de RS per capita diária, bem como, as rotinas de estimativas é composta e identificada pela caracterização gravimétrica e valor praticado na venda dos resíduos que possam ser reciclados. O modelo associa e estimulam as discussões relacionadas com a modelagem dinâmica dos RS, promovendo o desenvolvimento do pensamento teórico e da interação do que é produzido atualmente e o quanto poderá ser produzido futuramente, o que traz a luz para uma melhor estratégia de gerenciamento a ser empregada.

Palavras-chave: Modelagem de sistemas dinâmicos; Software STELLA; Modelagem do Resíduo Sólido.

## Dynamic model for predicting solid waste generation

**Abstract** - The growing challenges regarding the management of solid waste (SW) in the municipalities and the need to reduce the environmental impacts caused to the environment has been driving the search for strategies that provide solutions to such problems. Among these strategies is the use of dynamic systems modeling, which allows for analyzing the behavior of situations such as the generation of SW in a given period of time. Considering the need for studies that corroborate

for effectiveness in the management of SW, this study proposed a dynamic model to estimate the generation of SW and a routine to calculate the financial return of recycled waste. The model was built in the STELLA software and considered aspects such as the rate of populational growth, daily and per capita SW generation, as well as the components identified through gravimetric characterization and the values practiced in the sale of waste that are recycled in the region as well as, as well as estimates routines composed and identified by gravimetric characterization and the value practiced in the sale of recyclable waste. The model associates and stimulates discussion concerning the dynamic modeling of SW, promoting the development of theoretical thinking and interaction between what is currently produced and how much can be produced in the future, which shows the way for a better management strategy to employed.

**Key-words:** Dynamic systems modeling; Software STELLA; Solid Waste Modeling.

## Modelo dinámico para pronosticar la generación de residuos sólidos

**Resumen** - Los crecientes desafíos con respecto a la gestión de los residuos sólidos (RS) en los municipios y la necesidad de reducir los impactos ambientales causados al medio ambiente ha estado impulsando la búsqueda de estrategias que brinden soluciones a tales problemas. Entre estas estrategias se encuentra el uso del modelado de sistemas dinámicos, que permite analizar el comportamiento de situaciones como la generación de RS en un período determinado. Considerando la necesidad de estudios que corroboren a la efectividad en el manejo de RS, este estudio propuso un modelo dinámico para estimar la generación de RS y una rutina para calcular el retorno financiero de los residuos reciclados. El modelo se construyó en el software STELLA y consideró aspectos como la tasa de aumento de la población, la generación de RS per cápita diaria, así como las rutinas de estimación están compuestas e identificadas por la caracterización gravimétrica y el valor practicado en la venta de residuos que pueden ser reciclados. El modelo asocia y estimulan las discusiones relacionadas con el modelado dinámico de los RS, fomentando el desarrollo del pensamiento teórico y la interacción de lo que se produce actualmente y cuánto se puede producir en el futuro, lo que trae la luz a una mejor estrategia de gestión a utilizarse.

**Palabras-clave:** Modelado de sistemas dinámicos; *Software* STELLA; Modelado de Residuos Sólidos.

## Introdução

Os índices da produção dos Resíduos Sólidos (RS) vêm se elevando em todo o mundo, especialmente devido ao crescimento da população atrelado ao incremento no consumo dos recursos, transformando as predições do que estão por vir verdadeiros desafios (Goel et al. 2016). Os padrões atuais em que se observam o contínuo aumento nas gerações dos resíduos por conta da renda e dos modos de consumo em vigor, aparecem como desafios ligados à má gestão destes que, se mostram tanto como um desafio ambiental quando social e financeiro (Souza et al. 2015).

No Brasil, estima-se que 62,78 milhões de toneladas de resíduos sólidos tenham sido coletados em 2018, sendo que, deste total cerca de 24,4% ainda são dispostos de forma inadequada, em lixões e aterros controlados (Brasil 2019). Frente a tal situação, diversas políticas públicas vêm sendo implementadas ao decorrer dos anos com o objetivo de destinar de modo ambientalmente adequado os resíduos gerados. Dentre estas políticas no país, destacam-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei nº 12.305/2010, e o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que apresentam orientações, metas e orientações para a gestão dos resíduos sólidos no país.

Considerando o valor expressivo de resíduos gerados atualmente, quantificar o montante produzido torna-se imprescindível para realizar a seleção e mensuração das operações relacionadas a cadeia de gestão destes (Pisani Junior et al. 2018). Prever a produção dos resíduos sólidos representa um papel relevante no gerenciamento dos resíduos (Sukholthaman e Sharp 2016). Para alcançar a efetividade na implantação de tratamentos e das políticas públicas de gestão dos RS é preciso a obtenção de dados confiáveis acerca das taxas, composição e características da produção dos RS (Goel et al. 2016).

Dados obtidos de modelos de previsão vêm sendo utilizados no planejamento de métodos de gerenciamento de resíduos, como para criar estratégias, elaboração de planos de recolhimento dos resíduos, tratamentos e acondicionamento dos resíduos (Beigl et al. 2008). Dentre os métodos de modelagem estão os modelos de Sistemas Dinâmicos (SD) que consistem em uma abordagem moderna que faz uso de fluxos, *loops de feedback*, variáveis cooperantes e estoque para a natureza dinâmica dos sistemas de difícil compreensão em grande escala (Giannis et al. 2017).

Os modelos de sistemas dinâmicos foram inseridos por Jay Forrester na década de 50 e consiste em um sistema de modelagem matemática que colaboram para auxiliar a sociedade a compreender as ações de elementos interligados complexos ao decorrer do tempo (Guo et al. 2016). Os SD contribuem para definir e avaliar de modo racional a estrutura, as relações e formas de comportamento dos sistemas e subsistemas de difícil compreensão para buscar, analisar e diagnosticar os seus impactos de modo abrangente e integrado (Kollikkathara et al. 2010).

As variáveis principais que estabelecem a estrutura dos modelos de SD são os estoques, correspondem às variáveis do modelo que são reunidos no sistema, e os fluxos, referem-se às deliberações ou políticas do sistema (Rodrigues et al. 2019). De forma geral, os modelos dinâmicos são construídos como sistemas de equações diferenciais de alta ordem, não lineares e podendo ser estocásticos, reproduzindo as regras de escolha dos agentes, dos procedimentos naturais e organizações físicas importantes para o modelo (Sterman 2002).

Forrester (2011) afirma que os modelos de SD são instrumentos práticos para os criadores de políticas, de modo que estes possam ser utilizados na resolução de problemas importantes. Segundo o autor, algumas das principais definições pertencentes ao SD como o feedback e o comportamento contra intuitivo se encontram inseridos em áreas da administração, da teoria social e do cotidiano. No contexto da gestão dos RS, trabalhos relevantes utilizando modelagem de SD são encontrados na literatura (Karaveryris et al. 2002; Dyson e Chang 2005; Guo et al. 2016; Walters et al. 2016).

Autores como Beigl et al. (2008), Kollikkathara et al. (2010), Dissanayake (2016) e Sukholthaman e Sharp (2016) descrevem em seus estudos as vantagens de se utilizar a modelagem de sistemas dinâmicos. De modo geral, tais vantagens estão relacionadas com a possibilidade de analisar as relações entre os diversos fatores socioeconômicos, ambientais e de gestão, além de possibilitar a modelagem em processos da gestão integrada de resíduos no contexto do mundo real.

Dyson e Chang (2005) relatam que para montar um modelo dinâmico de sistema é necessário reconhecer um problema e criar uma hipótese que possa explicar o motivo do problema. Com isso, as etapas que favorecem o desenvolvimento da modelagem são descritas por Burack (2010) como ocorrendo em cinco: definição do tema; estudo exploratório; sondagem do problema; apresentação das soluções dos problemas e andamento dos assuntos no contexto do tema; e avaliação crítica das soluções propostas.

A escolha desta metodologia foi motivada pela possibilidade de avaliar, em perspectivas futuras, o quantitativo de resíduos produzidos no município de estudo, bem como, estimar o retorno

financeiro que os resíduos destinados à reciclagem proporcionarão ao local de estudo escolhido. Tais informações são de extrema relevância para o gerenciamento adequado dos resíduos e servem de apoio às tomadas de decisões dos gestores dos locais de disposição final dos resíduos sólidos.

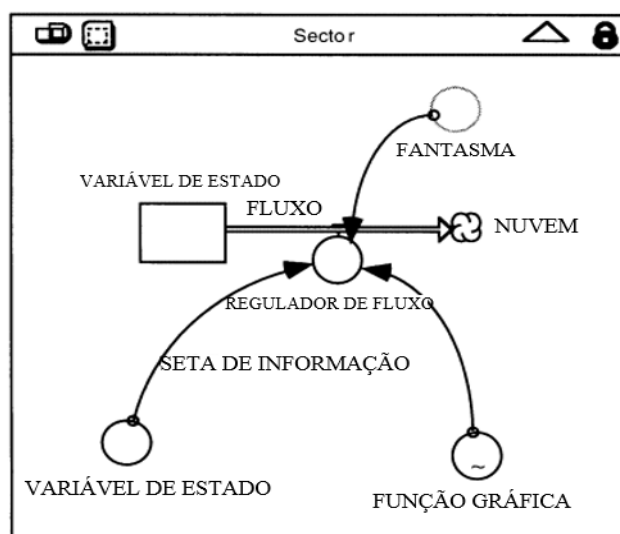
Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo propor um modelo dinâmico para estimar a geração dos resíduos sólidos, bem como, através de rotinas que utilizam a gravimetria e o valor praticado, podemos prever o retorno financeiro propiciado pelos resíduos que são reciclados no local de estudo escolhido. O modelo se propõe a fornecer uma metodologia útil e importante acerca da situação dos RS, podem ser utilizadas de base para o apoio às tomadas de decisões dos gestores dos resíduos em busca de um gerenciamento mais sustentável dessa problemática.

## Material e métodos

O desenvolvimento do modelo de previsão da geração dos resíduos sólidos (RS) e do retorno financeiro da venda dos componentes destinados à reciclagem foi construído utilizando a modelagem de sistemas dinâmicos no *software* STELLA versão 8.0 (ISEE SYSTEMS, 2019). O STELLA (Laboratório de Aprendizagem Experimental de Pensamento Estrutural com Animação) é um *software* de modelagem dinâmica que possibilita modelar Sistemas Dinâmicos (SD) de difícil resolução, porém tornando fácil a compreensão das interações entre as variáveis e coeficientes do modelo (Dissanayake 2016).

De acordo com Constanza e Voinov (2001), os recursos primordiais do *software* são estabelecidos em termos de estoques (variáveis de estado), fluxos (dentro e fora das variáveis de estado), variáveis auxiliares (relações algébricas, gráficas ou parâmetros fixos) e fluxos de dados. Os autores acrescentam que o *software* STELLA possui uma interface gráfica descomplicada (Figura 1) e, por isso, é reconhecido como um dos primeiros sistemas de modelagem dinâmica a atingir amplo reconhecimento e utilização.

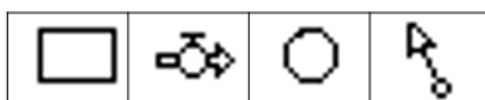
**Figura 1.** Interface gráfica do STELLA, que trabalha com fluxogramas e ajustes equacionais e parâmetros relativos a calibração e desenvolvimento do modelo.



**Fonte:** Adaptado de Constanza e Voinov (2001).

Dissanayake (2016) define os quatro componentes básicos que compõe os modelos no STELLA como sendo: os estoques, fluxos, conversores e conectores (Figura 2). De acordo com o autor, os estoques operam como reservatórios e armazenam uma população ou uma quantidade. Os fluxos agem como condutores e carregam de modo efetivo matéria física de um local no modelo para outro. Os conversores agem como parâmetros e proporciona dados para os estoques e fluxos. Enquanto que, os conectores encaminham os dados entre os estoques, fluxos e conversores.

**Figura 2.** Representação no STELLA dos ícones, da esquerda para direita, sendo estoques, fluxos, conversores e conectores, respectivamente.



As variáveis e os componentes incorporados ao modelo foram selecionados levando em conta os dados que são considerados pertinentes para a gestão efetiva dos resíduos sólidos, especialmente para os casos de gerenciamento dos RS nos municípios brasileiros. Desta forma, o Modelo Dinâmico de Resíduos Sólidos (MDRS) permite ao usuário obter uma boa perspectiva de todo o sistema e ajuda a compreender a importância ambiental e financeira proporcionada pelos resíduos que são encaminhados à reciclagem, especialmente pelos catadores nos locais de disposição final dos RS.

Inicialmente foram estabelecidas as variáveis endógenas (Galarza et al. 2015), como sendo aquelas que de algum modo podem-se monitorar e mensurar, adquirindo-as grande parte de modo visual, desta forma, oportunizando medir sua incidência, como é o caso da produção dos componentes do RS e dimensão dos resíduos. Além delas, foram definidas as variáveis exógenas, conceituadas pelos mesmos autores como aquelas adquiridas estatisticamente, com variação ao decorrer do tempo, como é o caso da projeção da população.

A estimativa populacional foi realizada por meio de modelo matemático (Função Linear) que pode ser implementada no sistema, de forma a ser baseado na relação da tendência de crescimento populacional do município, que de fato é são construídos através de dois censos demográficos consecutivos, com a tendência de crescimento e decréscimo nas Unidades da Federação, conforme empregada pelo IBGE (2010) e IBGE (2019). A projeção anual foi feita para um período de 20 anos (2019 à 2039), justificado por ser este o horizonte de tempo definido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos para estudos de gerenciamento de resíduos sólidos intermunicipais.

Esta técnica é útil para estimar populações de pequenas áreas que não contam com estatísticas vitais nos períodos intercensitários (González e Torres 2012). Neste caso, a Função Linear supõe que o incremento anual médio de uma população em um período conhecido recente se repetirá no futuro. Assim, o método supõe um aumento ou decréscimo constante da população (Gonzalez e Torres, 2012; Waldvogel e Capassi, 2016).

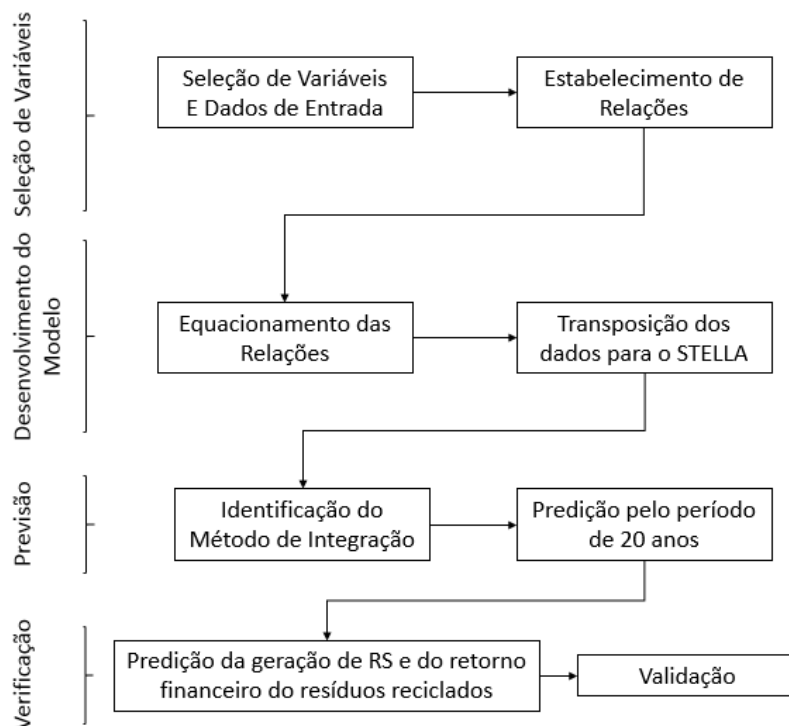
## Proposta de Modelo

O processo de elaboração do Modelo Dinâmico de Resíduos Sólidos-MDRS, ocorreu inicialmente com o planejamento das variáveis, componentes e relações matemáticas que iriam compor a estrutura do modelo, de modo a propor o modelo conceitual, promovendo o

desenvolvimento do pensamento teórico e da interação entre variáveis para estabelecer o MDRS. No contexto dos modelos computacionais, o operador não necessariamente trabalha de modo direto com as equações matemáticas, todavia, é necessário definir relações causais entre os componentes estabelecidos como importante para a análise do objeto de interesse (Galarza et al. 2018).

O estudo foi distinguido como tendo quatro partes principais mais relevantes (Intharathirat et al. 2015) que contribuíram na elaboração do modelo para prever a produção dos RS e o retorno econômico dos resíduos reciclados, conforme é apresentado na Figura 3.

**Figura 3.** Fluxograma do processo de construção do modelo dinâmico de resíduos sólidos proposto por este estudo.



No contexto deste estudo, o método de integração adotado foi o de Euler. Nele, os valores obtidos para os fluxos ofertam a estimativa para a modificação nos estoques equivalentes ao longo do intervalo de tempo ( $dt$ ). Isso, porque, “o método de Euler (ou o método da linha tangente) é um procedimento para construir soluções aproximadas a um problema de valor inicial para uma equação diferencial de primeira ordem” (Nagle 2012).

O documento técnico do *STELLA* descreve que as etapas de inicialização e interação no modelo ocorrem da seguinte forma:

#### I) Fase de inicialização

Etapa 1: Elabora-se uma lista com todos os estoques, fluxos e conversores em conformidade com a posição de avaliação que for preciso;

Etapa 2: Realiza-se o cálculo dos valores do início de todos os estoques, fluxos e conversores, de acordo com a posição de análise (Eq. 1 – Eq. 4);

$$\text{Tempo} = \text{Origem do Tempo} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Estoque}_{t=0} = f(\text{estoques iniciais, conversores e fluxos}) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{Conversores} = f(\text{estoques, conversores e fluxos}) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{Fluxos} = f(\text{estoques, conversores e fluxos}) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: “*f*” representa, em função desta(s) variável(is).

## II) Fase de Interação

Etapa 1: Fazer estimativa da modificação nos estoques no decorrer do intervalo de tempo *dt* (Eq. 5).

$$\Delta_{\text{estoque}} = \text{fluxo} (dt) \quad (\text{Eq. 5})$$

Calcular o novo valor para os estoques baseado na estimativa (Eq. 6).

$$\text{Estoque}_t = \text{Estoque}_{t-dt} - \Delta_{\text{estoque}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Etapa 2: Realizar os cálculos dos novos valores de fluxo e conversores conforme as Equações 3 e 4 (de acordo com a posição de avaliação).

Etapa 3: O operador e modelador, atualizar o tempo da simulação. Neste caso, interrompe a interação quando Tempo for maior ou igual ao tempo final da simulação.

$$\text{Tempo} = \text{Tempo} + dt \quad (\text{Eq. 7})$$

## Validação do Modelo

A validação do modelo matemático é uma fase importante e necessária na modelagem, pois permite averiguar a confiabilidade do modelo e dos resultados obtidos. Desta forma, após a transposição e modelagem dos dados para um município analisado, foi realizada a validação dos resultados do modelo proposto. A validação proposta foi feita com os resultados do Modelo Dinâmico de Resíduos Sólidos-MDRS alcançados neste estudo com o uso e comparação dos resultados do *software* de modelagem “Biogás, geração e uso energético” versão 1.0 elaborado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB.

Este *software* se diferencia do modelo proposto neste trabalho por possuir a finalidade de prever a produção de gás gerado a partir dos RS (CETESB 2006). Nele, além de estimar a geração do gás, é possível calcular a taxa populacional ao decorrer dos anos estudos, bem como o quantitativo acumulado dos resíduos a ser alcançado no município para este período. Os valores obtidos para a taxa populacional e o quantitativo de resíduos totais acumulados foram utilizados para validação por meio do nível de correlação de cada parâmetro obtidos quando aplicados a cada um dos softwares.

Tanto o MDRS quanto o *software* da CETESB, consideram no processo de modelagem a taxa populacional e os resíduos acumulados, parâmetros utilizados para validação neste artigo.

Entretanto, o MDRS pode ter maior flexibilização em sua implementação, pois o modelador e operador pode interagir com o intervalo, tempo de escolha (horas, dias, quinzenas, mês anos, etc) e fornecer dados da produção dos resíduos separadamente com o conhecimento gravimétrico de cada tipo de resíduo produzido.

Com isso, implementar a rotina, seu valor de venda que se modifica ao decorrer dos anos, além disso, este modelo facilita também a implementação de eventos endógenos e exógenos, como períodos de festas ou menores produções ao longo do ano bem como, incluir rotinas de produção do biogás, retorno mercado de carbono pela queima de metano, projeção de energia e também retorno financeiro da gestão do aterro sanitário pelos gestores envolvidos.

## Resultados e discussão

### Passos na construção do modelo

Estabelecido um período de análise amostral da modelagem dinâmica, considerando 20 anos que foi arbitrariamente proposto, visto que a NBR 13.896 (ABNT 1997) orienta que a implantação de aterro sanitária ocorra com planejamento de vida útil mínima de 10 anos, para que o mesmo possa ser viável. A vida útil depende da área de deposição do aterro sanitário disponível e de sua gestão em reaproveitar e reduzir através de reciclagem descrita no Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Brasil 2010), assim variando o tempo de vida útil de execução de cada aterro sanitário.

No modelo, a unidade de tempo adotada foi em dias, compreendendo o período desde o  $t=0$  do ano inicial ao  $t=7.300$  do vigésimo ano analisado, representando todos os dias contidos no espaço de tempo a ser estudado. Por conta disso, o intervalo de tempo  $dt$  entre os cálculos estabelecido foi igual a 1, definindo no modelo que cada interação em ajuste dos cálculos fosse realizada uma vez por dia.

Em busca de conhecer os fatores que influenciam na geração dos resíduos e o comportamento da população analisada, foi implementada uma rotina contendo as taxas de variação de natalidade, migração e de mortalidade para o período. No contexto dos municípios brasileiros, as projeções das taxas de cada município a serem utilizadas como, por exemplo, a população urbana, podem ser retiradas e calculadas a partir de bases de dados como o Censo Demográfico disponível no portal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2010; IBGE 2019).

Considerando a variação que ocorre na dinâmica populacional do município, foram estabelecidas relações no modelo, levando em conta as taxas como parâmetros e a população urbana como estoque. Para encontrar o aumento populacional foi considerado o somatório da população urbana com a taxa de natalidade atual (Eq. 8), enquanto que, a diminuição da população urbana foi obtida através do somatório da população urbana com a taxa de mortalidade (Eq. 9).

$$Pop_{Aumento} = Urbana\ Pop + Taxa\ de\ Natalidade \quad (Eq. 8)$$

$$Pop_{Diminuição} = Urbana\ Pop + Taxa\ de\ Mortalidade \quad (Eq. 9)$$

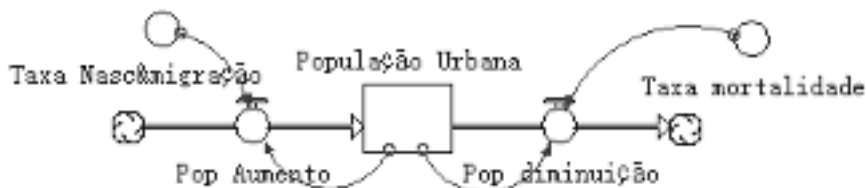


Em posse dos resultados das estimativas do aumento e diminuição da população urbana estudadas é possível obter a população urbana do local ao decorrer do período analisado através da Eq. 10. Encontrar a estimativa da população é de fundamental importância para assegurar maior confiabilidade ao estudo, isso porque, segundo Intharathirat et al. (2015), os quantitativos da população de localidades urbanas influenciam substancialmente de modo positivo na produção dos resíduos sólidos urbanos.

$$Pop_{urbana}(t) = Pop_{urbana}(t - dt) + (Pop_{aumento} - Pop_{diminuição}) \times dt \quad (Eq. 10)$$

No *software*, estas relações dos parâmetros supracitados foram interligadas ao fluxo do aumento e diminuição da população e estes, por sua vez, conectados ao quantitativo da população urbana, permitindo estimar o incremento populacional ao decorrer dos anos como descreve a Figura 4. Este diagrama contendo as equações e relações descritas acima também é apontado por Dissanayake (2016) como sendo o modelo mais simples para representar uma população dinâmica.

**Figura 4.** Diagrama da relação da dinâmica populacional considerada no modelo.



O passo seguinte na construção do MDRS é a identificação da produção diária de RS no ambiente de estudo. Assim, no modelo construído a população urbana foi interligada a produção diária dos resíduos da população (PD\_RS) através da relação algébrica apresentada na Eq. 11. Para estimar tal parâmetro, é preciso obter a razão entre o valor da produção diária dos resíduos do município multiplicado pela população urbana do município analisado e multiplicado pelo percentual de coleta de resíduos atendida no município estudado, dividido pelos parâmetros: população urbana do município multiplicado pela porcentagem da coleta atendida.

$$PD\_RSp = \frac{PD\_RS \times Pop_{urbana} \times \%coleta\ atendida\ no\ município}{Pop_{urbana} \times \%coleta\ atendida\ no\ município} \quad (Eq. 11)$$

Adicionalmente, à procura de se conhecer a geração total dos RSU (PD\_RSp), o parâmetro de produção diária da população foi interligado ao incremento de resíduos sólidos (Eq. 12) e este, ao parâmetro da geração diária de resíduos descrito pela Eq. 13. Os parâmetros avaliados representam importantes dados para o estudo, pois, como foi constatado no trabalho realizado por Dias et al. (2012) a geração dos RSU variam ao decorrer do ano por conta de diversos fatores como, influências climáticas, férias, festas ou quando é pago o 13º salário aos trabalhadores, culminando na inserção de mais dinheiro na economia e no aumento da produção dos RSU.

$$\text{Incremento dos RS} = f(\text{PD\_RSp}) \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\text{Geração de RS}(t) = \text{Geração de RS}(t - dt) + (\text{Incremento do RS}) \times dt \quad (\text{Eq. 13})$$

Os componentes identificados através do estudo de caracterização gravimétrica no local de disposição final a ser estudado devem ser alocados como estoque e ligados à geração dos RS no modelo. Estes componentes são considerados como variáveis de estado, ou seja, são responsáveis por definirem o estado do sistema analisado, devido a serem alocados como estoque no *software STELLA* e podendo assim, aplicar os respectivos valores aos resíduos sólidos produzidos, identificado individualmente, seus valores de comercialização. Para estimar a produção de cada componente identificado, foi estabelecido o cálculo proposto na Eq. 14 que considera os valores identificados em quilogramas multiplicado pelo valor em quilogramas pago a cada elemento gerado Eq. 15.

Porém para que possa ser implementada a rotina e calculado o retorno para cada componentes separadamente, faz-se necessário um estudo gravimétrico para assim compor as frações de cada resíduo produzido como, plástico, PET, papel, papelão, material orgânico, resíduos tecnológicos, trapos, madeira, Tetra Pak, vidros, entulho de construção, material de jardinagem, borracha, resíduos hospitalares, metal, alumínio e outros. O MDRS pode ser adaptado de acordo característica da geração dos resíduos do lugar que está sendo analisando, por isso, é possível que o usuário adicione ou retire componentes caracterizados e fracionado na gravimetria.

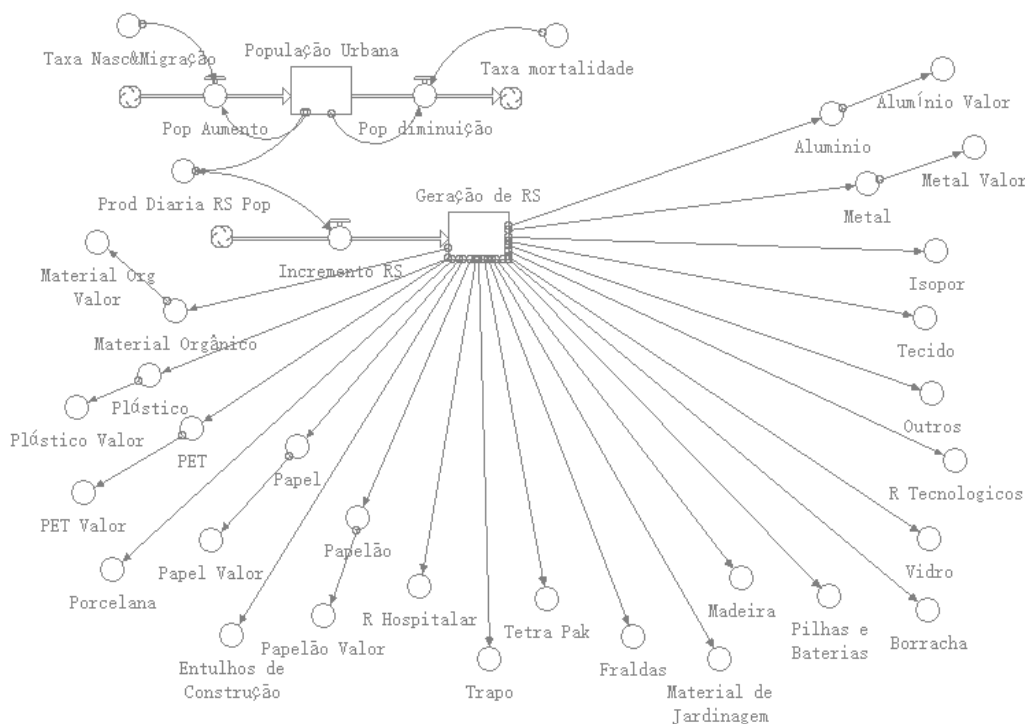
$$\text{Componente} = f(\text{Valor Identificado} \times \text{Geração fracionada dos RS}) \quad (\text{Eq. 14})$$

Além dos benefícios ambientais, Souza et al. (2015) ressaltam que, a destinação dos resíduos para o reaproveitamento traz vantagens sociais e financeiras, visto que propicia ganhos para a saúde, qualidade de vida da sociedade e a chance de gerar renda através da destinação de serviços na coleta, triagem e o tratamento de resíduos. Dessa forma, considerou-se importante estimar a predição econômica dos resíduos que são reaproveitados. O retorno financeiro dos componentes destinados à reciclagem no ambiente de estudo pode ser estimado através da Eq. 15. Para validar e trazer a luz de uma simulação para um item “hipotético”, incluiremos um item que represente 5% da composição total dos resíduos (Componente) e sua venda a um preço (Valor de Venda) de 75 centavos o quilograma.

$$\text{Valor do Componente} = f(\text{Componente} \times \text{Valor de Venda}) \quad (\text{Eq. 15})$$

Com a construção das relações matemáticas que descrevem o MDRS, o modelo de predição dinâmico é apresentado na Figura 5. Quando o modelo é implementado e ocorre a simulação, os resultados no MDRS no software podem ser acessados através da representação visual e numérica em gráficos e tabelas. Podendo observar diversas simulações com parâmetros variáveis em um mesmo gráfico, permitindo visualizar o impacto das modificações de parâmetros e políticas (Dissanayake 2016).

**Figura 5.** Representação esquemática do modelo dinâmico de fluxo e estoque construído e interações entre as variáveis de entrada, resultando no MDRS.



### Validação do Modelo

Como parâmetro de verificação, utilizamos a validação do modelo proposto pela análise comparativa dos resultados alcançados no STELLA (ISEE Systems 2019) e com os resultados obtidos no *software* “Biogás, geração e uso energético” versão 1.0. As variáveis modeladas no *software* construído pela CETESB (2006) e que permite avaliar a confiabilidade dos dados obtidos neste estudo são a estimativa populacional e a geração dos resíduos sólidos. Para a validação do modelo, foram utilizadas as mesmas informações para a previsão em ambos os modelos:

- I. Taxa Populacional: assim como no modelo construído no STELLA, é preciso considerar a população no município durante o período de análise. A diferença nesta etapa será apenas a conversão da taxa, que para este trabalho foi considerada como diária, e que será convertida para anual.
- II. População atual: foi utilizado a população urbana do município do primeiro ano analisado no estudo.
- III. Período: considerou-se em ambos os modelos um período de análise de 20 anos.
- IV. Taxa da geração de RS: o modelo proposto pela CETESB (2006) considera a taxa como sendo anual. Desta forma, para encontrá-la é preciso multiplicar a taxa da geração diária dos RS por 365, correspondendo a quantidade de dias existentes no ano.
- V. Taxa de coleta dos RS: levando-se em conta a existência da necessidade de avaliar a eficiência dos serviços de coleta nos municípios para estimar a geração dos RS, essa taxa será utilizada em ambos os modelos e corresponde ao valor estimado da eficiência da coleta dos RS no município estudado.

Os resultados obtidos nas projeções da população e dos resíduos acumulados totais por ano em ambos os *softwares* são apresentados na Tabela 1. Como é possível observar, os quantitativos alcançados para os dois parâmetros analisados alcançaram valores próximos durante todo o período analisado. Notemos que a diferença obtida entre os modelos, são devidas as formas como os modelos foram implementados, pois o modelo da CETESB é somente simulado anualmente e não pode ser simulado em outro intervalo de tempo.

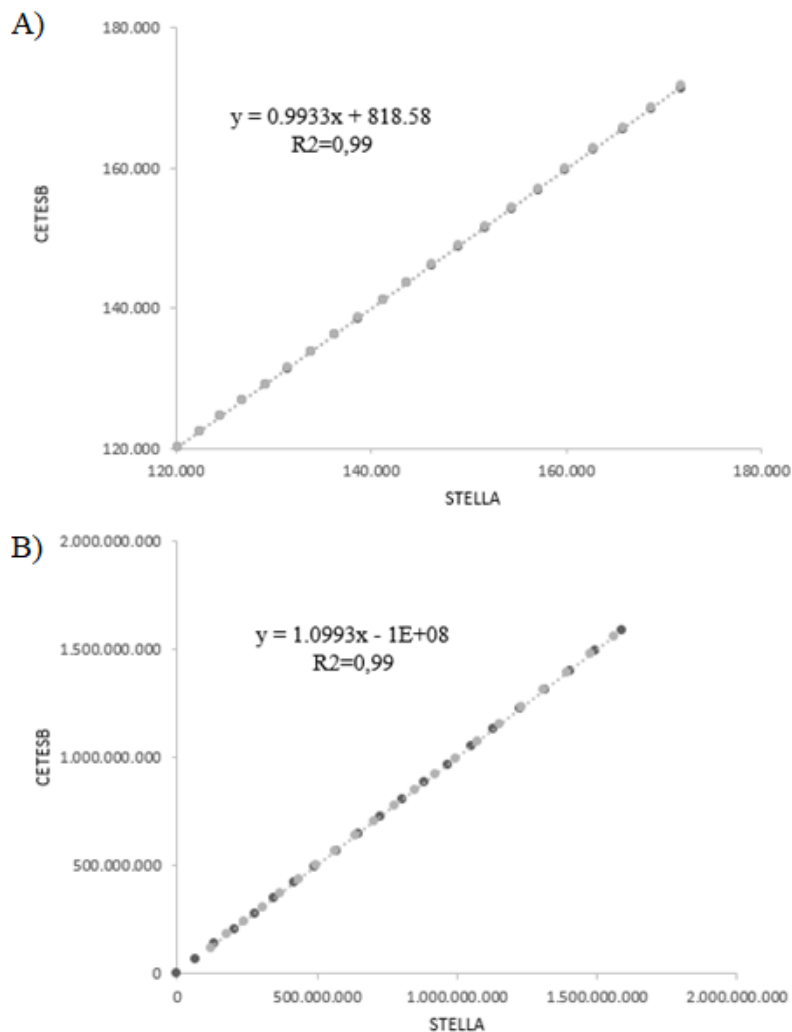
Enquanto que, o MDRS pode ser implementado em diversos intervalos de simulação, a escolha do gestor ou modelador. Neste caso, o MDRS foi simulado diariamente e seu incremento proporcionam variações advindas do método numérico diário e dos arredondamentos acumulados em cada intervalo de simulação. Porém os valores se tornam também mais fidedignos a medida que o operador aumenta a frequência da simulação em comparação aos resultados futuros.

**Tabela 1.** Quantitativo da população (habitantes) e resíduos acumulados (quilogramas) durante vinte anos obtidos pelo programa da CETESB e STELLA.

CETESB		STELLA	
População	Resíduos Acumulados	População	Resíduos Acumulados
120.228	118.102.320	120.228	181.250
122.392	178.714.611	122.379	66.926.121
124.595	240.417.923	124.569	134.865.514
126.838	303.231.894	126.799	204.020.808
129.121	367.176.517	129.068	275.386.745
131.445	432.272.143	131.378	346.066.526
133.811	498.539.491	133.729	419.001.648
136.220	565.999.650	136.123	493.242.078
138.672	634.674.093	138.559	568.811.176
141.168	704.584.675	141.039	645.732.722
143.709	775.753.648	143.563	724.030.920
146.296	848.203.663	146.132	803.730.407
148.929	921.957.778	148.747	884.856.263
151.610	997.039.467	151.409	967.434.014
154.339	1.073.472.626	154.119	1.051.489.646
157.117	1.151.281.582	156.878	1.129.959.895
159.945	1.230.491.099	159.685	1.224.140.820
162.824	1.311.126.388	162.543	1.312.790.690
165.755	1.393.213.112	165.452	1.403.027.112
168.738	1.476.777.397	168.413	1.494.878.480
171.775	1.561.845.839	171.427	1.588.373.697

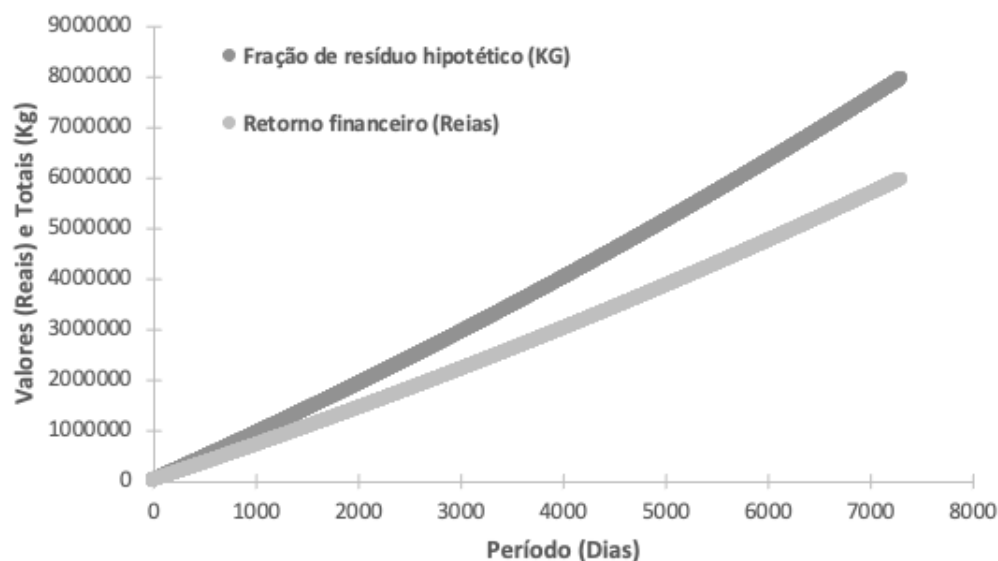
Os resultados da validação dos modelos utilizados mostram um nível de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,99 entre os valores da população (habitantes) e entre os valores para o acumulado dos RS totais (quilogramas) no município, conforme descreve a figura 6 a) e b), que apresenta também as equações dos gráficos. Desta forma, constata-se que o modelo proposto neste estudo possui resultados confiáveis e que podem ser utilizados como ferramenta de apoio no gerenciamento dos RS.

**Figura 6.** Resultados da validação da (a) população e dos (b) resíduos acumulados.



Para que possamos entender como a rotina de retorno financeiro pode ser implementada no modelo, simulamos a produção utilizada como referência para a validação encontrada na Tabela 1 e Figura 6. Aplicando o Item Hipotético com as frações e valores arbitrados na Eq. 15, podemos notar a projeção dos possíveis resultados acumulados para 20 anos (Figura 7), notamos também que o incremento em Quilogramas (7.941.868 quilos) e o retorno financeiro (5.956.401 reais) proposto para um item hipoteticamente incluso, denota como podemos entender e aplicar o MDRS para ser implementado em qualquer localidade, desde que haja o estudo gravimétrico.

**Figura 7.** Resultados da implementação de um item hipotético em quilogramas e os valores do retorno financeiro proporcionado pela sua venda por meio da reciclagem total deste Item.



## Considerações finais

Em vista da construção e dos resultados apresentados pela validação, o modelo MDRS demonstrou ser uma ferramenta útil no processo de simulação e eficaz para o gerenciamento dos RS nos municípios. As projeções a serem obtidas através do modelo proposto poderão servir de apoio às tomadas de decisões dos gestores dos locais de disposição final, propiciando uma base de informações confiáveis que pode ser utilizado no planejamento de implantação e manutenção de aterros sanitários. Além disso, o MDRS pode ser adaptado para ser utilizado como um protótipo para estudos de outras problemáticas envolvendo RS, bastando a implementações de rotinas e variando os intervalos de simulações.

Frente aos desafios enfrentados pelos municípios quanto à gestão dos RS gerados, especialmente de países em desenvolvimento, o modelo dinâmico construído se configura como uma alternativa possível e fácil de ser aplicado em municípios que desejam obter dados dos resíduos gerados e o retorno econômico que terão com a venda dos resíduos recicláveis uma vez que este modelo conceitual pode também ser adaptado um número maior de informações, variáveis e características que cada município precise para sua avaliação. Isto torna o MDRS, uma ferramenta de maior autonomia na implementação e com escolhas particulares propostas por cada usuário.

## Agradecimentos

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão das bolsas e ao Programa Interinstitucional de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais (PPGCTA) do Instituto Federal da Bahia (IFBA) e Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

**Participação dos autores:** FBZ - construção do modelo, validação, tratamento e processamento dos dados; metodologia, análise e discussão dos resultados; ALSC - Construção do modelo, organização, metodologia, análise de resultados e revisão de texto; RSC - revisão da metodologia adotada, organização; LCS - Construção do modelo, validação dos resultados; RMP - análise e discussão dos resultados.

**Aprovação ética:** Entendemos que esta pesquisa não necessita de aprovação ética ou licenças visto que não envolve animais ou humanos, e ainda, dispensa autorização de órgão ambientais ou afins.

**Disponibilidade dos dados:** Os dados analisados neste trabalho foram obtidos em fontes de acesso público e repositórios, devidamente referenciados ao longo do texto, os dados de campo, foram gerados pelos pesquisadores. Os produtos das análises não estão em bases ou repositórios.

**Fomento:** Este estudo foi realizado com a concessão de bolsas de pesquisa para ALSC, RSC e RMP pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB).

**Conflito de interesses:** os autores declaram não haver conflito de interesses.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. NBR 13.896: **Fixa condições mínimas exigíveis para projetos, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos não perigosos**. São Paulo: ABNT.

BEIGL, P.; LEBERSORGER, S.; SALHOFER, S. 2008. Modelling municipal solid waste generation: a review. **Waste Management**, 28:200-214.

BURACK, D. 2010. Modelagem matemática sob um olhar de Educação Matemática e suas implicações para a construção do conhecimento matemático em sala de aula. **Revista de modelagem matemática**, 1(1):10-27.

BRASIL. 2019. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018**. Brasília: SNS/MDR.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). 2006. **Biogás: geração e uso energético - versão 1.0/Cetesb**. São Paulo: CETESB. Disponível em: <Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>>. Acesso em: 26 jan. 2020.

DIAS, D. M.; MARTINEZ, C. B.; BARROS, R. T. V.; LIBÂNEO, M. 2012. Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais. **Revista de Engenharia Sanitária Ambiental**, 17(3):325-332.

DISSANAYAKE, S. T. M. 2016. Using STELLA simulation models to teach natural resource economics. **The Journal of Economic Education**, 47:40-48.

DYSON, B.; CHANG, N. 2005. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. **Waste Management**, 25:669-679.

FORRESTER, J.W. 2011. Research: pioneers and innovators. In: ASSAD A.A. & GASS S.I. (eds.). **Profiles in Operations Research**. New York: Springer. p. 363-386.

GALARZA, L. H. W.; GÓMEZ, S. T. R.; GARCEZ, E. O.; CORREA, É. C.; PORRAS, Á. C.; FORERO, I. H. 2015. Modelo dinâmico de sistemas para o gerenciamento de resíduos da construção civil na cidade de Porto Alegre: estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 20(3):463-474.

GIANNIS, A.; CHEN, M.; YIN, K.; TONG, H.; VEKSHA, A. 2017. Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore. **J Master Cycles Waste Manag**, 19:1177-1185.

- GONZÁLEZ, L. M.; TORRES, E. Estimaciones de población en áreas menores en América Latina:revisión de métodos utilizados. In: CAVENAGHI, S. (Org.). **Estimaciones y proyecciones depoblación en América Latina**. Desafíos de una agenda pendiente. Rio de Janeiro: Alap, 2012.
- GUO, H.; HOBBS, B. F.; LASATER, M. E.; PARKER, C. L.; WINCH, P. J. 2016. System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: a Baltimore case study. **Waste Management**, 56: 547-560.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de 2010**. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=9673&t=sobre>>. Acesso em 09 abr. 2020.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD**. Síntese de indicadores 2019.
- INTHARATHIRAT, R.; SALAM, P. A.; KUMAR, S.; UNTONG, A. 2015. Forecasting of municipal solid waste quantity in a developing country using multivariate grey models. **Waste Management**, 39:3 – 14.
- STELLA ONLINE. Isee systems, [2019?]. Página inicial. Disponível em: < <https://www.iseesystems.com/store/products/stella-online.aspx>>. Acesso em 16 abr. 2020.
- KARAVEZYRIS, V.; TIMPE, K.; MARZI, R. 2002. Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste. **Mathematics and Computers in Simulation**, 60:149-158.
- KOLLIKATHARA, N.; FENG, H.; YU, D. A 2010. System dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. **Waste Management**, 30:2194-2203.
- NAGLE, R. K.; SAFF, E. B.; SNIDER, A. D. 2012. **Equações Diferenciais**. São Paulo, 8ª edição, Pearson Education do Brasil.
- PISANI JUNIOR, R.; CASTRO, M. C. A. A.; COSTA, A. Á. 2018. Desenvolvimento de correlação para estimativa da taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: influências da população, renda per capita e consumo de energia elétrica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23(2):415-424.
- RODRIGUES, G. O.; PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. O.; TREVISAN, M.; BARCELOS, D. V. 2019. Um modelo computacional para análise da produção de biodiesel, a partir do óleo de cozinha, e uso na coleta de resíduos sólidos urbanos. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, 15(1):189-209.
- SOUZA, O. T.; CHAVES, I. R.; ALVIM, A. M. 2015. Reciclagem e gestão de resíduos sólidos como possibilidades para a geração de benefícios sociais, econômicos e ambientais. **Revista Grifos**, 24(38/39):51-70.
- STERMAN, J. D. 2002. **Business dynamics: system thinking and modeling for a complex world**. Working Paper Series, ESD Internal Symposium, Massachusetts Institute of Technology.
- SUKHOLTHAMAN, P.; SHARP, A. 2016. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: a casa of Bangkok, Thailand. **Waste Management**, 52:50-61.
- WALDVOGEL, B.; CAPASSI, R. Projeção populacional como instrumento de planejamento regional: o caso do Estado de São Paulo. **Anais do XI Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, p. 2753-2765, 2016.



Esta obra está licenciada com uma *Licença Creative Commons Atribuição Não-Comercial 4.0 Internacional*.