

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS AMBIENTAIS E DE TECNOLOGIAS
CEATEC

Vinícius Gottschall Criscuolo

**Um modelo baseado em dinâmica de sistemas como critério orientador para
gestão de resíduos sólidos urbanos em cidades de médio porte: estudo de
caso em Itatiba, Brasil**

Campinas

2022

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA

VINÍCIUS GOTTSCHALL CRISCUOLO

UM MODELO BASEADO EM DINÂMICA DE SISTEMAS COMO CRITÉRIO
ORIENTADOR PARA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM
CIDADES DE MÉDIO PORTE: ESTUDO DE CASO EM ITATIBA, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Custódio Urban

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

363.7285
C932m

Criscuolo, Vinícius Gottschall

Um modelo baseado em dinâmica de sistemas como critério orientador para gestão de resíduos sólidos urbanos em cidades de médio porte: estudo de caso em Itatiba, Brasil / Vinícius Gottschall Criscuolo. - Campinas: PUC-Campinas, 2022.

98 f.: il.

Orientador: Rodrigo Custódio Urban.

Dissertação (Mestrado em Sistema de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistema de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

Inclui bibliografia.

1. Resíduos sólidos. 2. Planejamento urbano. 3. Itatiba (SP). I. Urban, Rodrigo Custódio. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistema de Infraestrutura Urbana. III. Título.

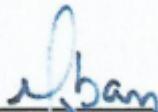
CDD - 22. ed. 363.7285

VINÍCIUS GOTTSCHALL CRISCUOLO

**UM MODELO BASEADO EM DINÂMICA DE SISTEMA
COMO CRITÉRIO ORIENTADOR PARA GESTÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM CIDADES DE
MÉDIO PORTE: ESTUDO DE CASO EM ITATIBA,
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Custódio Urban.

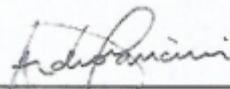
Dissertação defendida e aprovada em 26 de janeiro de 2022 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Rodrigo Custódio Urban
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini
Universidade Estadual Paulista - UNESP



Dedico a Odin, pai de todos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha noiva Monique por suportar minhas noites difíceis dedicadas a execução deste trabalho e por estar sempre ao meu lado;

A minha família por providenciar todo o suporte necessário para eu trilhar meu caminho e conquistar meus objetivos;

A meus colegas da Prefeitura de Itatiba, em especial aos Engenheiros Denis e Carol, por me auxiliar com as informações deste trabalho e não medirem esforços para possibilitar a realização do mesmo;

Ao meu orientador Rodrigo, por me guiar nessa jornada árdua, cansativa e gratificante, a qual sem a luz de uma mente brilhante, difícil seria a obtenção dos resultados;

Aos meus colegas da PUC Campinas que me acompanharam nos trabalhos e nas disciplinas ministradas na faculdade, tornando essa jornada feliz e prazerosa;

Ao meu irmão gêmeo Rodrigo, que mesmo distante continua perto de mim;

Aos meus amigos do Carvalho Dojo, em especial ao meu Sensei Pedro, por me proporcionar disciplina, saúde e foco na minha rotina;

E, por fim, a PUC Campinas, pela oportunidade e por todos os ensinamentos prestados pela sua equipe técnica, essenciais para a minha formação acadêmica.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

No presente projeto é proposta a elaboração de um modelo de simulação baseado na abordagem da Dinâmica de Sistemas para auxiliar o gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) da cidade de Itatiba, SP. Pretende-se que o modelo de simulação permita a avaliação de diferentes cenários para o gerenciamento de RSU, contribuindo para um processo de apoio à tomada de decisão dos gestores municipais. Os 04 cenários propostos prevêem a evolução da coleta da fração orgânica e reciclável dos Resíduos Sólidos Urbanos, apresentado pelo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Itatiba, sendo o cenário 1 o cenários base, o 2 com a evolução da coleta da Fração Orgânica dos RSU apenas, o 3 com a evolução da coleta dos recicláveis apenas, e o 4 com a evolução das duas coletas. O modelo e os respectivos cenários foram validados com dados históricos da gestão pública de RSU. As equações matemáticas representativas do sistema complexo foram elaboradas mediante consulta à bibliografia especializada. Os dados para validação da metodologia foram obtidos no banco de dados do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS) e da Prefeitura de Itatiba-SP, e demonstraram a proximidade da realidade com o sistema de gestão de RSU do Município. Dentre os quatro cenários previstos, aquele que possui a evolução para a coleta das diferentes frações de RSU (cenário 4) demonstrou ser o mais eficaz para aumento da vida útil do aterro. O cenário 3, com a previsão da coleta da FORSU, comprovou ser o mais adequado para a realidade do município devido às peculiaridades inerentes ao sistema.

Palavras-chave: Modelo de Simulação, Tomada de Decisão, Reciclagem, Disposição final, Tratamento de resíduos.

ABSTRACT

The present project proposes the elaboration of a simulation model based on the Systems Dynamics approach to assist the management of Urban Solid Waste (MSW) in the city of Itatiba, SP. It is intended that the simulation model allows the evaluation of different scenarios for the management of MSW, contributing to a process of support to the decision-making of municipal managers. The 04 proposed scenarios foresee the evolution of the collection of the organic and recyclable fraction of Urban Solid Waste, presented by the Municipal Plan for Integrated Management of Solid Waste of Itatiba, with scenario 1 being the base scenario, the 2 with the evolution of the collection of the Organic Fraction of MSW (OFMSW) only, 3 with the evolution of the collection of recyclables only, and 4 with the evolution of the two collections. The model and the respective scenarios were validated with historical data from public MSW management. The representative mathematical equations of the complex system were elaborated by consulting the specialized bibliography. Data for the validation of the methodology were obtained from the database of the National Sanitation Information System (NSIS) and the Municipality of Itatiba-SP, and demonstrated the proximity of reality with the Municipality's MSW management system. Among the four foreseen scenarios, the one that has the evolution for the collection of different MSW fractions (scenario 4) proved to be the most effective for increasing the useful life of the landfill. Scenario 3, with the forecast of the FORSU collection, proved to be the most suitable for the reality of the municipality due to the peculiarities inherent to the system.

Keywords: Simulation Model, Decision Making, Recycling, Final disposal, Waste treatment.

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

FORSU - Frao Orgnica dos Resíduos Sólidos Urbanos

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH - ndice de Desenvolvimento Humano

Km - Quilmetros

MSW - Municipal Solid Waste

PCJ - Piracicaba, Capivari e Jundiá

PIB - Produto Interno Bruto

PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS - Política Nacional de Resíduo Sólidos

RMC - Região Metropolitana de Campinas

RSA - Resíduos Sólidos Alimentícios

RSO - Resíduos Sólidos Orgânicos

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SD - System Dynamics

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento

UTM - Universal Transversa de Mercator

Sumário

1. Introdução	12
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. Revisão Bibliográfica	15
3.1. Modelagem matemática	15
3.2. A Dinâmica de Sistemas	16
3.3. Resíduos Sólidos Urbanos	19
3.4. Política Nacional de Resíduos Sólidos e os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos	20
4. Metodologia	23
4.1. Área de estudo	23
4.2. Levantamento dos dados	23
4.2.1. Valores médios de resíduos encaminhados ao aterro sanitário municipal	24
4.2.2. População Municipal e Estadual	24
4.2.3. Coleta Seletiva	26
4.2.4. Coleta comum	28
4.2.5. Geração per capita	28
4.3. Cenários propostos	30
4.4. Modelagem computacional	31
4.4.1. Desenvolvimento do modelo	31
4.4.2. Tipos de variáveis	33
4.4.3. Formato adotado para o modelo	33
4.4.4. Equações utilizadas	34
4.4.5. Variáveis adaptadas	46
4.4.6. Validação do modelo	46
5. Resultados obtidos e discussão	49
5.1. Validação do modelo	49
5.2. Variáveis obtidas	56
6. Conclusão	92
6.1. Do modelo matemático	92
6.2. Dos resultados obtidos	92
7. Referências Bibliográficas	94
Apêndice A - Equações utilizadas para a variável LOOKUP na ferramenta VENSIM	97

1. Introdução

O desenvolvimento econômico, aliado com o crescimento exponencial da população decorrente do processo de urbanização, trouxe diversos desafios globais para a resolução do problema da crescente geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no mundo, com a estimativa de sua geração anual de até 2,2 bilhões de toneladas por ano em 2025 (USMANI *et al.*, 2020). Isto demandou dos gestores públicos a busca por ações que pudessem garantir o saneamento básico para a população e que reduzissem os impactos ambientais resultantes da alta densidade populacional.

Uma das ferramentas para auxílio no planejamento público é a modelagem por meio da Dinâmica de Sistemas. Segundo Tang e Vijay (2011) a Dinâmica de Sistemas é uma poderosa ferramenta que possibilita entender os problemas e obter uma visão ampla sobre as intervenções políticas, sendo aplicado com sucesso no campo empresarial e socioeconômico.

De acordo com Sterman (2003):

A Dinâmica de Sistemas é uma perspectiva e um conjunto de ferramentas conceituais que nos permite compreender as estruturas e as dinâmicas dos sistemas complexos. A Dinâmica de Sistemas também é um método de modelagem rigoroso que permite construir simulações formais computacionais de sistemas complexos e usá-los para projetar políticas públicas e organizações mais eficazes.

A modelagem pela Dinâmica de Sistemas nasceu em 1950 pelo engenheiro de sistemas, Jay Forrester. Sua experiência em sistemas de controle de *feedbacks* durante a Segunda Guerra e seu acesso prematuro aos primeiros computadores, proporcionaram o avanço da compreensão dos processos industriais (YEARWORTH, 2014). Foi em 1973 que deu-se início a aplicação dessa modelagem aos gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, tendo, ao final de 2012, pelo menos 20 estudos publicados relacionados ao tema (CAI e LIU, 2013).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305 de agosto de 2010, trouxe diversas diretrizes para auxílio na gestão dos resíduos sólidos, tendo como pilar a não geração, seguida da redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada, mais conhecida como ordem de prioridade (BRASIL, 2010). Além desta ferramenta, a PNRS priorizou o acesso aos recursos da União para os municípios que elaborassem seus Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, exigindo dos gestores públicos o planejamento de ações futuras que possibilitasse seu devido cumprimento.

O Plano Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Itatiba-SP foi elaborado recentemente e conta com diversas proposições para gestão dos resíduos gerados no município. Podemos citar, dentre elas, a realização da digestão anaeróbia dos Resíduos Sólidos Alimentícios (RSA), pois representam uma alta parcela dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) recebidos no Aterro Sanitário Municipal (ITATIBA, 2019).

Como o PMGIRS foi elaborado em 2019, este trabalho tem como objetivo avaliar cenários futuros para a gestão de RSU, por meio da elaboração de um modelo de simulação baseado em dinâmica de sistemas e apresentar diferentes cenários que apoiem o processo de tomada de decisão do poder público.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Analisar quatro diferentes cenários por meio da modelagem da Dinâmica de Sistemas para a gestão dos resíduos sólidos urbanos do Município de Itatiba-SP, de forma a verificar as variações na quantidade de RSU gerados e encaminhados para o aterro sanitário municipal, possibilitando a verificação da vida útil estimada pela municipalidade e a formatação de um modelo matemático que se aproxime da realidade do sistema.

2.2. Objetivos Específicos

- Obter os dados referente à gestão dos RSU de Itatiba;
- Definir as equações inerentes ao sistema a ser modelado;
- Definir os cenários que representem as opções de gestão de RSU para o município;
- Validar o modelo proposto;
- Identificar os cenários mais favoráveis à gestão de RSU no município; e
- Avaliar a estimativa da vida útil do aterro sanitário municipal fornecida pela Prefeitura do Município de Itatiba.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Modelagem matemática

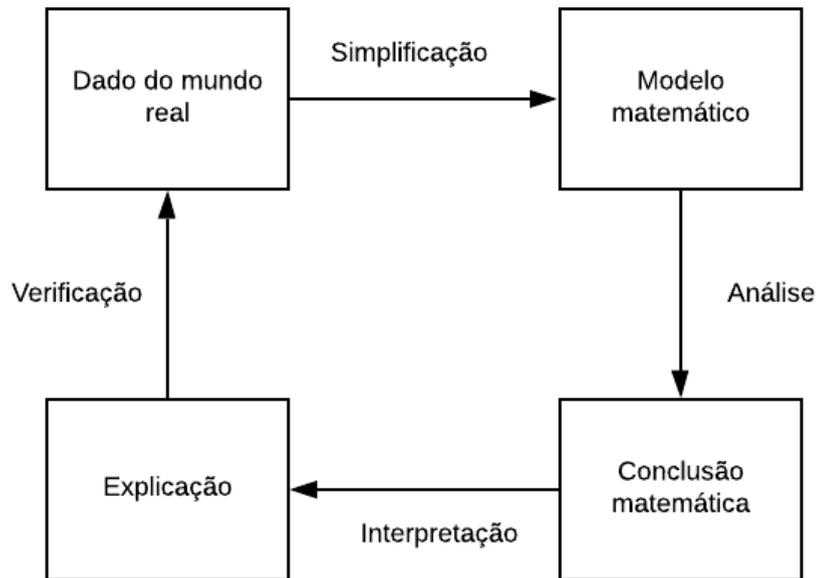
A modelagem matemática consiste na tentativa da representação das características de um sistema por meio de um conjunto de equações. No entanto, alguns fenômenos não possuem parâmetros pré-definidos ou as leis da física relacionadas não foram determinadas, levando a necessidade da aplicação de uma modelagem experimental. (OGATA, 2003). Um modelo matemático pode ser descrito como uma representação dos fenômenos mundanos e pode auxiliar na compreensão de um comportamento ou no planejamento do futuro (GIORDANO; FOX; HORTON, 2014).

De acordo com Ogata (2003) para a obtenção de uma modelagem computacional deve-se seguir as seguintes etapas:

1. Elaborar o diagrama de um sistema e definir suas variáveis.
2. Verificar a resposta e a combinação das variáveis dentro do sistema, por meio da elaboração de equações matemáticas para cada componente em observação às leis da física.
3. Validar o modelo elaborado por meio de resultados experimentais. Se o resultado previsto desviar muito do fenômeno experimentado, deve-se elaborar um novo modelo e testá-lo até que se chegue num resultado satisfatório.

Na Figura 01 é possível observar a representação genérica de um processo de modelagem matemática. O objetivo principal da modelagem é o entendimento, a interpretação e previsão de fenômenos e situações do mundo real, a partir de uma simplificação. Essa simplificação é essencial para viabilizar a utilização de modelos.

Figura 01. Exemplificação do processo de modelagem matemática



Fonte: adaptado de Giordano, Fox e Horton (2014)

Sem a modelagem, a capacidade de percepção dos impactos das decisões tomadas é muito baixa. A complexidade dos sistemas vão além da compreensão do ser humano e os principais fatores que dificultam essa percepção são: a mudança constante, estão fortemente acoplados, são governados por *feedback*, não são lineares, são dependentes do passado, são auto-organizáveis, adaptativos, caracterizados por trade-offs, contra intuitivos e resistentes à políticas (STERMAN, 2003).

3.2. A Dinâmica de Sistemas

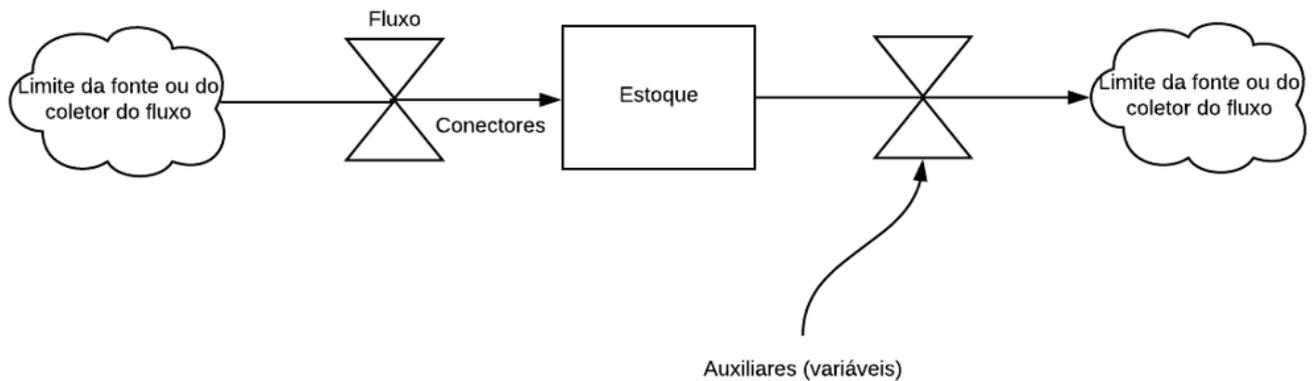
A Dinâmica de Sistemas (ou *System Dynamics*) é a utilização de modelos matemáticos, por meio da modelagem computacional, com o intuito de entender a complexidade dos diversos sistemas que existem no planeta e melhorar sua performance (OGATA, 2003). Dessa forma, tal ferramenta possibilita ao seu usuário ter uma análise holística do funcionamento do sistema em que foi aplicada, permitindo diagnosticar os principais problemas que o afetam.

De acordo com Zhao *et al.* (2011), a dinâmica de sistemas pode ser resumida em 5 etapas:

1. Definição do objetivo de pesquisa. De acordo com o problema, quais fatores são importantes para serem incluídos no modelo e quais fatores podem ser excluídos e, portanto, serem usados para encontrar os limites do sistema estudado. O comportamento hipotético do sistema e o horizonte do tempo devem ser identificados.
2. Desenvolvimento de uma hipótese dinâmica em termos de diagramas de ciclo causal e diagramas de estoque e fluxo.
3. Implementação do modelo para simulação.
4. Avaliação do modelo. Os testes podem auxiliar a avaliar a viabilidade e precisão da estrutura do modelo e filtrar variáveis. A flexibilidade da modelagem permite testar a sensibilidade de modelos com estruturas alternativas. A avaliação da sensibilidade dos parâmetros é útil para decidir o esforço que deve ser dedicado ao aumento da precisão dos parâmetros.
5. Quando uma confiança razoável no modelo é alcançada, a avaliação de diferentes políticas e cenários pode ser realizada. Os resultados de mudança de cenários são automaticamente listados ou descritos como gráficos pelos softwares específicos, e auxiliam os tomadores de decisão.

No modelo de simulação baseado em sistemas complexos (Dinâmica de Sistemas), um modelo é construído com basicamente quatro componentes: estoques, fluxos, auxiliares e conectores. Os estoques são variáveis de estado e podem ser considerados como repositórios onde algo é acumulado, armazenado e passado para outros elementos do sistema. Os fluxos são variáveis de ação e podem alterar os estoques, aumentando ou diminuindo seu volume. Os auxiliares servem para formular os dados para definir as equações dos fluxos combinando, através de operações algébricas, fluxos, estoques e outros auxiliares. Os conectores representam as inter-relações entre todos os componentes do sistema. São essas inter-relações que ligam os componentes que formarão a expressão matemática (DEATON; WINEBRAKE, 2000). Na Figura 2 é possível observar um exemplo de diagrama de fluxo de SD, com a representação dos elementos de estoque e os conectores.

Figura 02. Exemplificação de um diagrama de fluxo de Dinâmica de Sistemas



Fonte: adaptado de Guo *et al.* (2016).

Os diagramas de estoques e fluxos ilustram qual a interação entre as variáveis de um sistema, de acordo com a estrutura lógica do software de modelagem computacional. Sua ilustração leva em consideração o objetivo da pesquisa e a influência que os instrumentos de política representam no sistema observado (ANRESNANI; WIDODO; SYAIRUDDIN, 2018).

A função de um modelo por dinâmica de sistemas é de avaliar a evolução do comportamento do conjunto de variáveis em função do tempo. Estas variáveis variam por meio de equações diferenciais $dx/dt = f(x,y)$ que podem ser resolvidas por meio de um software de simulação como, por exemplo, o Vensim® (GUO *et al.*, 2016). Dessa forma, os valores obtidos para os fluxos irão modificar os valores dos estoques ao longo do intervalo de tempo (dt), representando o método de integração de Euler. Nele, são construídas soluções aproximadas de um problema para um dado valor inicial para formação de uma equação diferencial de primeira ordem (NAGLE, 2012).

O software Vensim foi criado em 1985 com o desenvolvimento de simulações em larga escala integradas com elementos comerciais e técnicos para solução de problemas complexos. No entanto, para otimização no tempo de desenvolvimento do modelo, o programa criou sua própria linguagem de simulação. Com o passar dos anos, o software foi sofrendo atualizações que facilitaram a interação do usuário com o modelo e otimizaram sua performance. A versão utilizada neste trabalho,

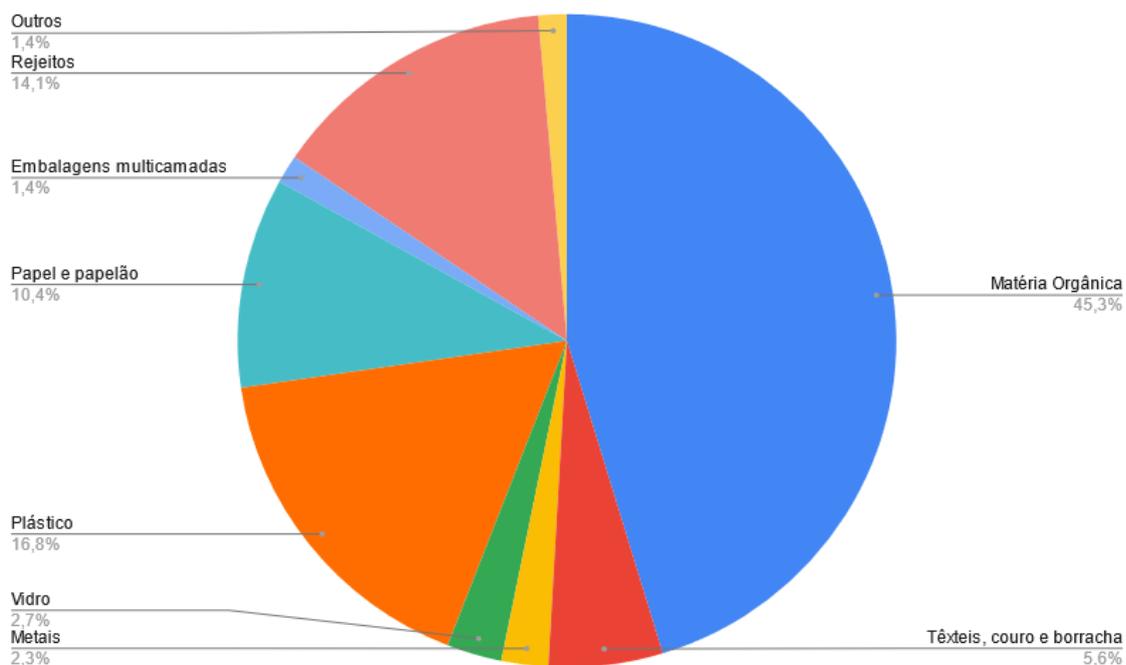
versão PLE, foi desenvolvida para propósitos acadêmicos e possui um menu mais simplificado.

3.3. Resíduos Sólidos Urbanos

Os Resíduos Sólidos Urbanos, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010 em seu art. 13 item I, subitem i, podem ser divididos em dois grupos, quanto a origem e quanto a periculosidade. No caso, os resíduos sólidos urbanos são aqueles que, quanto a sua origem, englobam os resíduos domiciliares provenientes das atividades domésticas nas residências, e de limpeza urbana, provenientes da limpeza pública do município, varrição de ruas, praças e outros locais (BRASIL, 2010).

De acordo com ABRELPE (2020)) a estimativa da composição dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil é predominantemente de materiais recicláveis e de matéria orgânica, conforme Figura 3.

Figura 03. Composição dos resíduos sólidos urbanos do Brasil



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

Um estudo realizado por Giannis *et al.* (2012) com a aplicação da modelagem computacional para um sistema de gestão de resíduos na cidade-Estado de Singapura, demonstrou que um leve aumento no Produto Interno Bruto (PIB) reflete no aumento do total de resíduos dispostos. Dados do Banco Mundial (KAZA *et al.*, 2018) demonstram que os países com o maior PIB e geração de resíduos per capita são os Estados Unidos, a China e a Dinamarca, respectivamente, o que corrobora com o estudo de Giannis *et al.* (2012). No Brasil, estudos recentes demonstram que nas regiões nordeste, centro-oeste e Sudeste, o PIB reflete diretamente no aumento da geração dos RSU, sendo a última região, a com maior correlação (NORBERTO *et al.*, 2021).

De acordo com Guerrero *et al.* (2013), os principais fatores que influenciam a efetividade do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos em países em desenvolvimento são: a geração e a separação; a coleta, transferência e o transporte; o tratamento; a disposição final; a reciclagem; o desenvolvimento técnico; os aspectos ambientais; os aspectos financeiros e econômicos; os fatores sócio-culturais como os hábitos, a cultura e as crenças; a presença efetiva de uma instituição/organização; e os aspectos legais/políticos. Estes, reforçam a complexidade dos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos e demonstram a necessidade de aplicações de ferramentas de modelagem para providenciar uma análise mais precisa das variáveis mais impactantes.

3.4. Política Nacional de Resíduos Sólidos e os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

Um grande passo dado pelo Brasil no setor de resíduos sólidos foi a instituição da Lei Federal nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ela contém instrumentos e diretrizes para auxílio na evolução dos sistemas de gerenciamento e gestão desses materiais, como incentivo à formação de consórcios públicos, estímulo para formação de cooperativas de triagem e reciclagem e implantação de Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, entre outros. (BRASIL, 2010). De acordo com Oliveira e Junior (2016) a prestação dos serviços públicos deve observar os princípios gerais da administração

pública elencados no Art. 37 da Constituição Federal, o qual demonstra que o planejamento é condição indispensável para a eficiência da gestão.

Para alcançar os objetivos da PNRS e promover a ordem de prioridade da gestão de resíduos, que segue pela não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, respectivamente, o artigo 9 estabelece os seguintes instrumentos:

- I- Os planos de resíduos sólidos;
- II- Os inventários e o sistema declaratório anual de resíduos sólidos;
- III- A coleta seletiva, os sistemas de logística reversa e outras ferramentas relacionadas à implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- IV- O incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis;
- V- O monitoramento e a fiscalização ambiental, sanitária e agropecuária;
- VI- A cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos;
- VII- A pesquisa científica e tecnológica;
- VIII- A educação ambiental;
- IX- Os incentivos fiscais, financeiros e creditícios;
- X- O Fundo Nacional do Meio Ambiente e o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;
- XI- O Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR);
- XII- O Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (Sinisa);
- XIII- Os conselhos de meio ambiente e, no que couber, o de saúde;
- XIV- Os órgãos colegiados municipais destinados ao controle social dos serviços de resíduos sólidos urbanos;
- XV- O Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos;

Além disso, algumas ações como à gestão compartilhada e o estímulo para a formação de consórcios intermunicipais vem a tona como forma de auxílio aos municípios de menor porte, pois sua pequena capacidade gerencial, aliada ao baixo volume orçamentário, inviabilizam as ações efetivas de limpeza urbana e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos (HEBER e SILVA, 2014). Outros

aspectos importantes que a lei trouxe foi a do conceito de resíduos sólidos como material apto a reutilização e reciclagem, e os rejeitos como insumo inservível em uma cadeia produtiva (OLIVEIRA e JUNIOR, 2016).

No âmbito municipal, o artigo 14 define os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PMGIRS, como planos de resíduos sólidos e estabelece, conforme artigo 18, a necessidade de os municípios elaborarem os mesmos para obtenção de recursos da União. O respectivo Plano, deverá conter o diagnóstico da situação dos resíduos gerados no respectivo território, a identificação dos geradores, programas e ações com vistas ao cumprimento da Ordem de Prioridade, metas de redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, entre outros (BRASIL, 2010). Estes últimos, foram objetos do presente estudo para formulação dos diferentes cenários previstos para a melhoria do sistema de coleta dos recicláveis e da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU).

Martins (et al., 2017), em análise ao PMGIRS do município de Araraquara, relatou alguns problemas para implantação do referido Plano, como assuntos de ordem financeira, investimentos em materiais, equipamentos e pessoal, expansão da educação ambiental, estratégias para redução do volume de resíduos gerados, maior participação e controle social, consolidação de acordos setoriais para implantação da logística reversa e aumento na quantidade de recicláveis coletados.

Oliveira e Junior (2016) avaliaram o conteúdo de 17 Planos Municipais para populações acima de 200 mil habitantes e verificaram que a maioria deles não estão de acordo com o conteúdo mínimo previsto pela PNRS, com a defasagem nos quesitos de monitoramento e estabelecimento de metas de redução, reutilização, coleta e reciclagem. Isto demonstra uma necessidade da aplicação de estudos mais elaborados pelos municípios quando da etapa da revisão dos referidos documentos, de forma a garantir o respectivo cumprimento.

4. Metodologia

4.1. Área de estudo

O município de Itatiba está localizado nas proximidades das coordenadas UTM 311.919 Leste e 7.454.340 Norte. Possui um território de 322,276 km² e uma população estimada de 120.858 pessoas (IBGE, 2020). Está inserido na bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Bacias PCJ) e integra a Região Metropolitana de Campinas (RMC), tendo acesso pelas rodovias dos Bandeirantes, Anhanguera e Dom Pedro I. De acordo com o IBGE (2021) a cidade possui um Produto Interno Bruto de R\$ 52.722,16 (374º lugar no Brasil) mil e um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,778 (145º lugar no Brasil).

De acordo com informações obtidas junto à Prefeitura do Município de Itatiba, a cidade foi fundada em 1857 e se desenvolveu no entorno do córrego Rio Atibaia e seu afluente, o Ribeirão Jacaré, o qual possibilitou o desenvolvimento de sua principal agricultura, o caqui. Em relação a indústria, Itatiba teve como primeiras grandes indústrias as do ramo têxtil, de fósforos e calçados. Após, o surto de desenvolvimento veio com o ramo moveleiro, com característica principal a produção de móveis no estilo colonial.

4.2. Levantamento dos dados

Os dados necessários para a elaboração do modelo de simulação foram obtidos junto à Prefeitura Municipal de Itatiba, extraídos do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) e de outras fontes de dados como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Foram levantadas informações, como: geração diária, mensal e anual de RSU, os tipos de resíduos gerados no município e suas destinações finais previstas, a taxa de reciclagem, a taxa de disposição dos resíduos, entre outros.

O horizonte da coleta dos dados para a validação do modelo matemático foi de 4 anos (2016-2019), com base nos dados obtidos via SNIS, e para a formatação

do modelo foi de 20 anos (2018-2037), com base nos programas previstos pelo PMGRIS, justificado por ser o horizonte de tempo definido pela PNRS para gerenciamento de resíduos sólidos intermunicipais (BRASIL, 2010).

4.2.1. Valores médios de resíduos encaminhados ao aterro sanitário municipal

Em consulta ao PMGIRS, verificou-se a realização de duas análises gravimétricas, as quais embasaram a formatação do documento. O resumo dos dados obtidos por ambos pode ser consultado na Tabela 01 a seguir.

Tabela 01. Resumo dos dados obtidos entre as duas análise gravimétricas realizadas para o Município

Coleta 1 (2014)		Coleta 2 (2017)		Média
Tipo de resíduos	% do todo	Tipo de resíduos	% do todo	
Orgânicos	39,14	Orgânicos	66,1	52,62
Recicláveis	34,23	Recicláveis	19,56	26,89
Rejeitos	25,57	Rejeitos	9,28	17,42
Resíduos perigosos	0,2	Resíduos perigosos	0	0,1
Outros	0,86	Outros	5,06	2,96

Fonte: adaptada do PMGIRS

A média dos valores entre ambas foi utilizada como base para formatação dos diferentes cenários do modelo proposto, sendo 52,62% para os resíduos orgânicos e 26,89% para os recicláveis, os quais também foram adotados pelo PMGIRS. Esses, serviram de base para o desenvolvimento das variáveis vinculadas ao aumento/melhoria do sistema de coleta com o aumento da porcentagem desses resíduos encaminhados para o aterro sanitário municipal.

4.2.2. População Municipal e Estadual

O levantamento da população municipal e da estadual foi necessário para formatação das variáveis vinculadas ao crescimento populacional. Ambas foram obtidas por meio da base de dados histórica do IBGE (2021) e também serviram de

base para a construção da estimativa do número de pessoas entre 2016 a 2037, conforme descrito no cálculo da projeção populacional, item 4.4.4. deste trabalho.

Tabela 02. Dados obtidos para a população do estado e a população do município

Ano	Pop. Estado de São Paulo	Pop. Municipal
2010	42298906	101471
2011	42707383	-
2012	43119841	-
2013	43528708	-
2014	43937755	-
2015	44356304	-
2016	44760305	-
2017	45149603	-
2018	45538936	-
2019	45919049	-
2020	46289333	-
2021	46649132	124254
2022	46997428	-
2023	47333288	-
2024	47656295	-
2025	47966292	-
2026	48263115	-
2027	48548516	-
2028	48816331	-
2029	49072504	-
2030	49315046	-
2031	49544302	-
2032	49760463	-
2033	49963489	-
2034	50153386	-
2035	50330107	-
2036	50493492	-
2037	50643366	-

Fonte: elaborada pelo autor com base nos dados do IBGE (2021)

4.2.3. Coleta Seletiva

Os dados obtidos para a coleta dos resíduos recicláveis do Município de Itatiba foram extraídos do PMGIRS. De acordo com o Plano, em 2018, a quantidade de resíduos que foram reciclados, representou uma média de 4,33% da quantidade total de resíduos sólidos urbanos coletados no município no mesmo ano (aproximadamente 1.373,65 toneladas por ano). Desse total, 33,67% representam a porcentagem de rejeitos no processo de triagem e comercialização realizado pela Cooperativa Reviver, conforme tabela 03 a seguir.

Tabela 03. Quantitativo anual recebido e triado pela Cooperativa Reviver

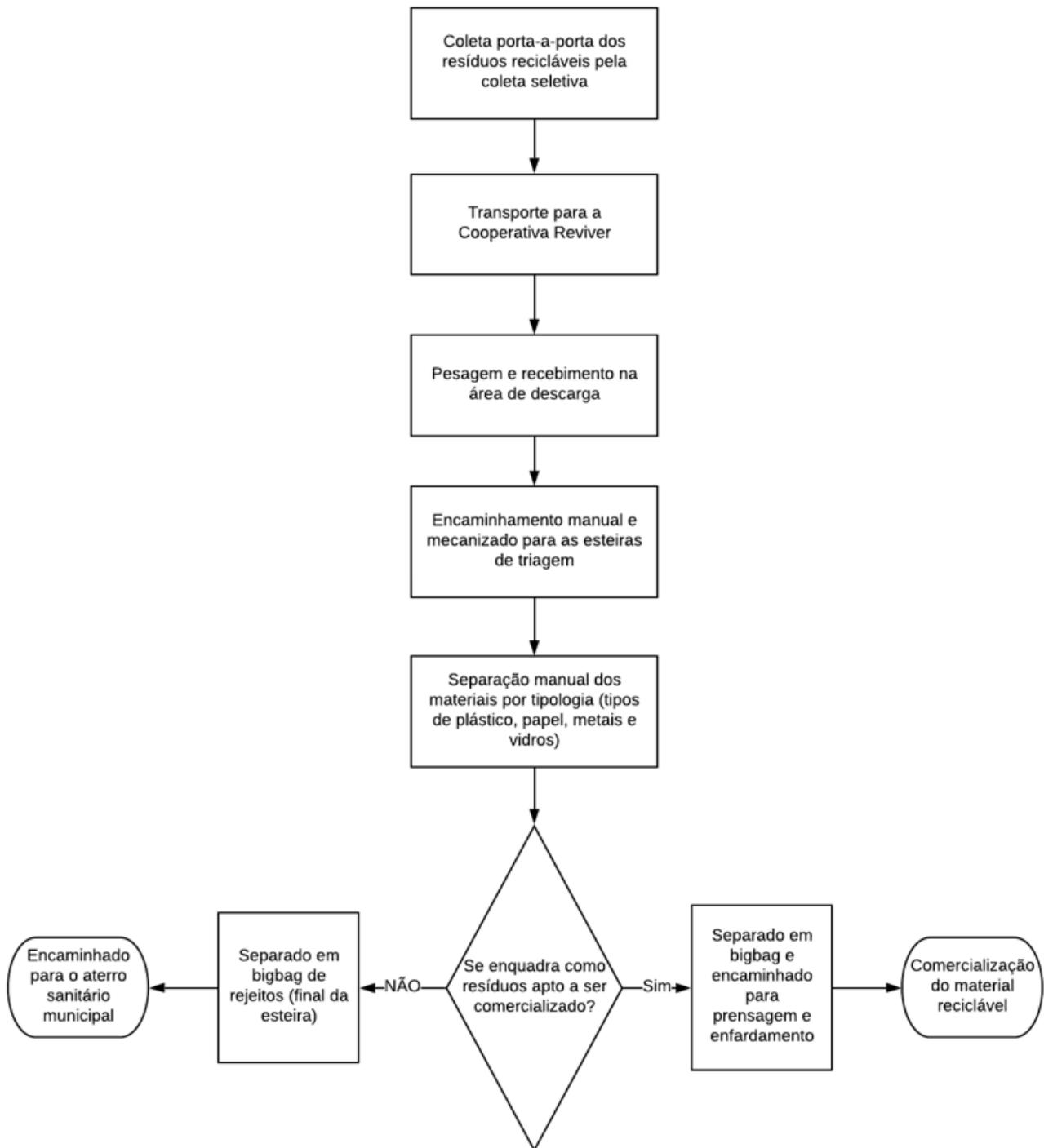
Ano	Coletado (t)	Comercializada (t)	Rejeito (t)
2014	1833,69	1380,96	452,73
2015	2045,22	1036,45	1008,77
2016	2135,07	1248,43	886,64
2017	1931,54	1267,09	664,45
2018	1817,74	1373,66	444,08
Média	1952,652	1261,318	691,334

Fonte: adaptado do PMGIRS de Itatiba

Os resíduos coletados pela coleta seletiva municipal, realizada semanalmente, são encaminhados para a Cooperativa Reviver, a qual irá realizar o processo de triagem, compactação e comercialização dos materiais. Ainda de acordo com o Plano, o galpão da Cooperativa possui a capacidade máxima de triagem de 166,40 toneladas por mês (1996,8 t/ano) que, conforme a tabela supracitada, está próxima do limite.

O processo de reciclagem adotado para o município de Itatiba pode ser visualizado na figura 04 a seguir.

Figura 04. Diagramação do processo de recebimento e triagem dos resíduos recicláveis pela Cooperativa



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 05. Vista do galpão de triagem de materiais recicláveis



Fonte: extraída do PMGIRS (ITATIBA, 2019)

4.2.4. Coleta comum

A coleta comum é a coleta dos resíduos sólidos domiciliares que não se enquadram como resíduos recicláveis e nos locais em que não são abrangidos pela coleta seletiva. Nela, fazem parte, principalmente, os resíduos chamados neste trabalho como Fração Orgânica dos RSU (FORSU) e os rejeitos. Ela é realizada diariamente pela Prefeitura em alguns bairros mais adensados e três vezes por semana nos outros.

Os outros materiais acabam sendo encaminhados concomitantemente devido às peculiaridades do sistema de coleta, como a mistura dos mesmos no caminhão de coleta, a não separação adequada dos resíduos e a falta de respeito com as datas estipuladas para os diferentes resíduos por parte da população.

4.2.5. Geração per capita

A geração per capita é utilizada como variável base dentro dos modelos apresentados, pois é necessária para a estimativa do total de RSU que serão coletados. Ela foi extraída dos dados fornecidos pelo PMGIRS relacionados ao

quantitativo total dos RSU que foram encaminhados tanto para o aterro sanitário, quanto para a Cooperativa. Seus valores podem ser visualizados na tabela a seguir.

Tabela 04. Geração per capita obtida para a coleta de RSU

Ano	População Municipal	Quantidade gerada per capita (kg/habitante/ano)	Total gerado per capita (ton/habitante/ano)
2016	118247	0,75	0,27375
2017	120114	0,75	0,27375
2018	121981	0,76	0,2774
2019	123804	0,76	0,2774
2020	125580	0,77	0,28105
2021	127306	0,77	0,28105
2022	128976	0,78	0,2847
2023	130587	0,78	0,2847
2024	132136	0,79	0,28835
2025	133622	0,79	0,28835
2026	135046	0,8	0,292
2027	136415	0,8	0,292
2028	137699	0,81	0,29565
2029	138928	0,81	0,29565
2030	140091	0,81	0,29565
2031	141190	0,82	0,2993
2032	142227	0,82	0,2993
2033	143201	0,83	0,30295
2034	144111	0,83	0,30295
2035	144959	0,84	0,3066
2036	145742	0,84	0,3066
2037	146461	0,85	0,31025

Fonte: elaborada pelo autor com as informações do PMGIRS

Os valores de aumento da taxa de geração per capita correspondem a uma previsão proposta pelo PMGIRS.

4.3. Cenários propostos

Com o intuito de avaliar a efetividade das ações e metas previstas pelo PMGIRS para o curto (04 anos), médio (08 anos) e longo prazo (20 anos), foram propostos os seguintes cenários:

- ❖ Cenário 1: evolução temporal do cenário base, sem alteração dos parâmetros de compostagem e reciclagem;
- ❖ Cenário 2: evolução temporal que segue as metas previstas no PMGIRS para a compostagem dos Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO), sem alteração para a reciclagem:
 - Redução de 35% de RSO encaminhados ao Aterro (meta de curto prazo);
 - Redução de 55% de RSO encaminhados ao Aterro (meta de médio prazo);
 - Redução de 80% de RSO encaminhados ao Aterro (meta de longo prazo).
- ❖ Cenário 3: evolução temporal que segue as metas previstas no PMGIRS para a reciclagem dos RSU, sem alteração para a compostagem:
 - Redução de 37% de recicláveis encaminhados ao Aterro (meta de curto prazo);
 - Redução de 42% de recicláveis encaminhados ao Aterro (meta de médio prazo);
 - Redução de 50% de recicláveis encaminhados ao Aterro (meta de longo prazo).
- ❖ Cenário 4: evolução temporal que segue as metas previstas no PMGIRS para a reciclagem dos RSU e compostagem dos RSO, conforme previsões dos cenários 2 e 3.

Os diferentes cenários previstos variam de acordo com a porcentagem estimada dos diferentes resíduos para o modelo, e não em sua totalidade. Ou seja, o aumento de até 80% previsto para a melhoria da coleta dos RSO corresponde aos

80% dos 52,62% da FORSU, obtidos pela média das análises gravimétricas, o que corresponde, do total, em 42,09%, e vice-versa.

4.4. Modelagem computacional

Para o desenvolvimento do modelo computacional, foi adotada a metodologia proposta por Law e Kelton (1991) adaptada para o município, que consiste:

1. Estudos exploratórios em manuais de referência, artigos científicos e entrevistas com gestores da área de resíduos sólidos;
2. Desenvolvimento da solução pela elaboração dos modelos formais, aptos a representarem o problema;
3. Aplicação computacional, utilizando-se o simulador Vensim (VENTANA SYSTEMS, 2020);
4. Validação da solução, por meio de testes, utilizando-se de quatro cenários propostos.

A validação proposta, além de garantir a verificação do modelo computacional em questão, pode auxiliar na correção de parâmetros, equações e variáveis do mesmo.

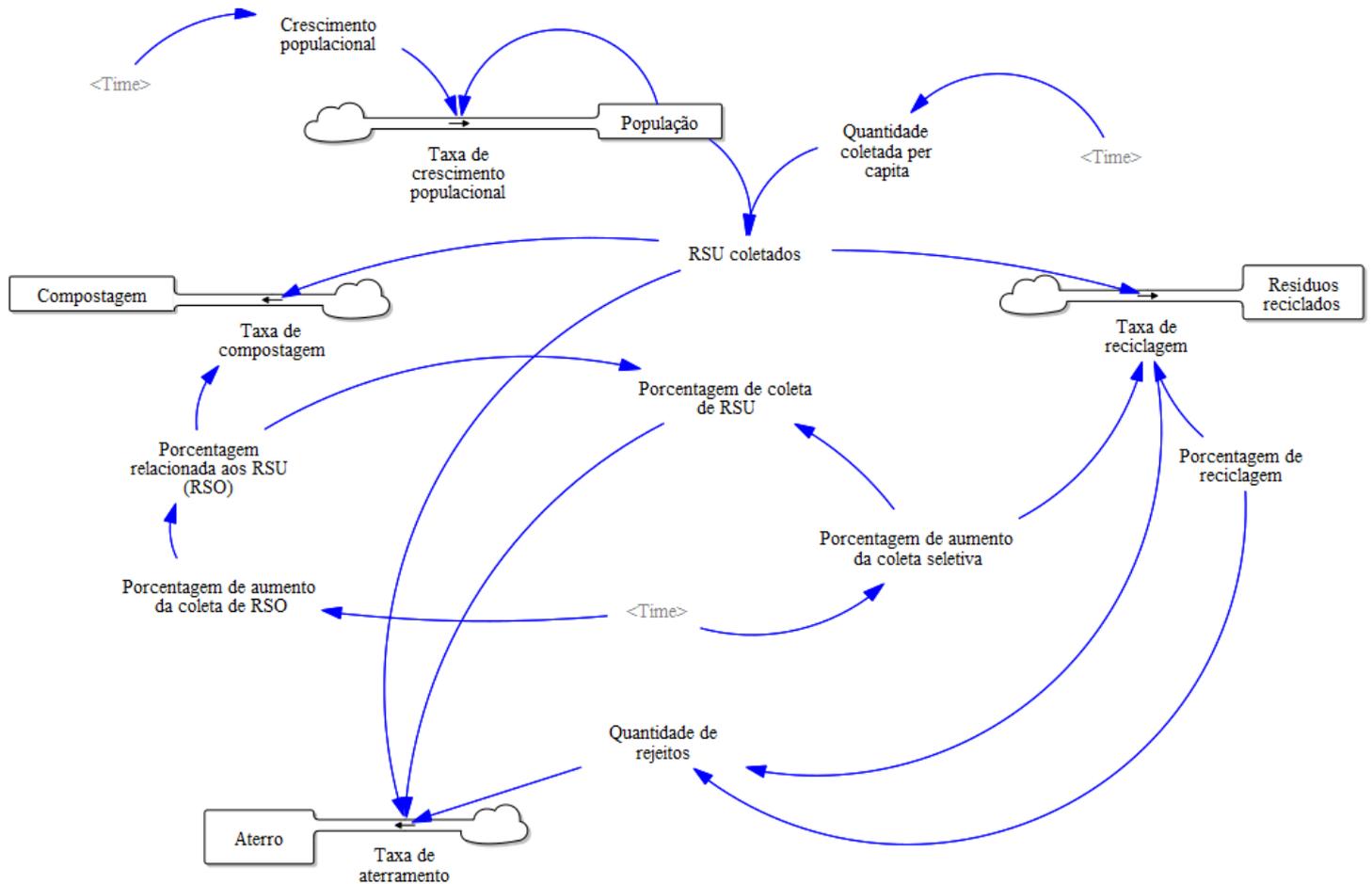
4.4.1. Desenvolvimento do modelo

Para a formatação do modelo computacional de gestão de resíduos sólidos do Município de Itatiba, foi realizada a adaptação do proposto por Pinha e Sagawa (2020) para a geração de resíduos sólidos de municípios de médio porte, ajustado para a realidade do município. De acordo com IBGE (1999), os municípios podem ser divididos em pequeno (até 50 mil habitantes), médio (até 200 mil habitantes) e grande porte (acima de 200 mil habitantes).

O modelo consiste na relação da geração de resíduos sólidos com o crescimento populacional, os resíduos recicláveis, a compostagem e o destino final para o aterro sanitário. Com o alinhamento das variáveis, foi possível mapear os principais fatores que corroboraram para a redução no recebimento de rejeitos no

aterro, como o aumento da reciclagem, o aumento da população e o aumento da coleta da FORSU. A seguir, o modelo obtido.

Figura 06. Modelo de geração de resíduos sólidos obtido para todos os cenários



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

A Figura 06 representa o modelo obtido para todos os cenários. O mesmo considerou todas as variáveis vinculadas ao sistema de coleta e destinação dos RSU encaminhados ao aterro sanitário municipal de Itatiba. Ele também contempla as variáveis base (crescimento populacional, taxa de crescimento populacional, população, quantidade coletada per capita e RSU coletados), as variáveis da coleta seletiva (taxa de reciclagem, resíduos reciclados, porcentagem de aumento da coleta seletiva, porcentagem de reciclagem e quantidade de rejeitos), as variáveis da coleta e destinação da FORSU (compostagem, taxa de compostagem, porcentagem relacionada aos RSU (RSO) e porcentagem de aumento da coleta de RSO) e as

variáveis do encaminhamento ao aterro sanitário (porcentagem de coleta de RSU, taxa de aterramento e aterro), totalizando 17 variáveis com suas respectivas equações.

4.4.2. Tipos de variáveis

A utilização de um software para formatação de modelos matemáticos é necessária quando existe a necessidade de se resolver um problema matemático complexo, o qual seria complicado de se solucionar sem uma simulação. As equações de um software de simulação geralmente estão atreladas a uma variável de tempo e, portanto, são modeladas por equações em formato de integrais.

Para formatação do modelo matemático, é imprescindível o conhecimento do entendimento das variáveis utilizadas no modelo que, neste caso, foram as seguintes:

- Auxiliares: são as variáveis dinâmicas calculadas a partir de outras variáveis em função do tempo. Sua expressão envolve outras variáveis na equação;
- Constantes: são as variáveis em que seu valor não muda conforme o tempo.
- *Level*: são as variáveis dinâmicas e todas possuem a função de integral em suas equações.
- *Lookup*: são as funções não lineares com parâmetros pré-definidos em um gráfico de eixos x e y. São definidas com um parênteses à esquerda no início e um à direita no final.

4.4.3. Formato adotado para o modelo

A configuração do tempo utilizada foi baseada nas propostas de metas de curto, médio e longo prazo do PMGIRS. Com o intuito de observar sua variação ao longo de um período fixo, foi adotado o seguinte formato para o tempo:

- Tempo inicial: 1
- Tempo final: 20
- Intervalo de tempo: 1
- Unidade de tempo: anos

- Tempo inicial: 2018
- Tempo final: 2037

O desenvolvimento do modelo da previsão da geração dos resíduos sólidos urbanos que serão encaminhados para o aterro sanitário municipal de Itatiba e a evolução dos diferentes cenários para a coleta da fração orgânica e da seletiva foi construído utilizando a modelagem de sistemas dinâmicos no software Vensim PLE versão 9.0.0 (VENTANA SYSTEM, 2020).

4.4.4. Equações utilizadas

Crescimento Populacional

Para obtenção da projeção populacional, foi realizado o cálculo proposto pela Nota Metodológica n. 01 do IBGE (IBGE, 2021), com base no método proposto por Madeira e Simões (1972), em que é analisada a tendência de crescimento populacional de um determinado Município, entre dois censos demográficos consecutivos, comparando-a com a tendência demográfica de uma área geográfica maior. Este, tem como princípio a subdivisão desta área em n áreas menores para que a soma das menores reproduza a área maior. Dessa forma, o cálculo para um população estimada em um momento (t) se inicia com a seguinte consideração:

$$P_i(t); i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

Onde $P(t)$ é a subdivisão da área maior em n áreas menores, representada pela população de uma determinada área i . Complementarmente, tem-se que:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (2)$$

Após, é realizada a decomposição da área i em dois termos, sendo o primeiro, dependente do crescimento da população da área maior, denominado coeficiente de proporcionalidade do incremento da população da área menor i em relação ao incremento da população da área maior, identificado como “ a_i ”, e o coeficiente linear de correção, identificado como “ b_i ”. Dessa forma, tem-se a seguinte expressão:

$$P_i(t) = a_i P(t) + b_i \quad (3)$$

Esses coeficientes são determinados utilizando-se o período conhecido entre outros dois Censos Demográficos, definidos como t_0 e t_1 , formando as seguintes equações:

$$P_i(t_0) = a_i P(t_0) + b_i \quad (4)$$

$$P_i(t_1) = a_i P(t_1) + b_i \quad (5)$$

Ao resolvê-las, obtém-se:

$$a_i = (P_i(t_1) - P_i(t_0)) / (P(t_1) - P(t_0)) \quad (6)$$

$$b_i = P_i(t_0) - a_i P(t_0) \quad (7)$$

Para a estimativa de um determinado período, as unidades consideradas são:

P_i : População do Município i ;

P : População da Unidade da Federação;

t_0 : População na data em 2000;

t_1 : População na data em 2010;

t : População na data de referência.

De acordo com os censos IBGE para os anos de 2000 e 2010, a população do Município de Itatiba era de 80.884 e 101.471 pessoas, respectivamente. A população da Unidade de Federação para os anos de 2000 e 2010 (São Paulo) é de 36.969.476 e 41.262.199, respectivamente. Dessa forma, ao utilizar esses dados na

expressão de a_i e b_i foi obtido 0,004795790457 e -96413,86, respectivamente. Substituindo esses valores na expressão de $P_i(t_0)$ obteve-se o valor de 127.305 habitantes para o ano de 2021 para Itatiba. As estimativas dos outros anos foram obtidas da mesma forma, utilizando-se da estimativa proposta para a Unidade de Federação determinada pelo censo do IBGE (2021) e convertendo-a para a municipalidade, proporcionando a obtenção dos dados da tabela 05 a seguir.

Tabela 05. Projeção Populacional para o Município de Itatiba para os anos de 2018 a 2037

Pop. Estado de São Paulo	Ano	Pop. Mun.	Porcentagem de crescimento
45538936	2018	121981	0,015
45919049	2019	123804	0,01494443642
46289333	2020	125580	0,01434364401
46649132	2021	127306	0,0137404005
46997428	2022	128976	0,01312082586
47333288	2023	130587	0,01248848411
47656295	2024	132136	0,01186241965
47966292	2025	133622	0,0112511619
48263115	2026	135046	0,01065315877
48548516	2027	136415	0,01013524385
48816331	2028	137699	0,009415298325
49072504	2029	138928	0,008922009049
49315046	2030	140091	0,008372567616
49544302	2031	141190	0,007848224135
49760463	2032	142227	0,007342312971
49963489	2033	143201	0,006845893418
50153386	2034	144111	0,006359655283
50330107	2035	144959	0,005880989646
50493492	2036	145742	0,00540539999
50643366	2037	146461	0,004931746431

Fonte: Elaborada pelo autor

Taxa de crescimento populacional

A taxa de crescimento populacional é uma variável auxiliar vinculada ao número de pessoas no Município e multiplicada pela taxa de crescimento populacional. Sua equação está descrita a seguir.

$$\text{Crescimento populacional}(t) = \text{Taxa de crescimento populacional}(t) \times \text{população}(t)$$

(8)

Unidade: pessoas

População

A população é uma variável vinculada diretamente à taxa de crescimento populacional. Para sua utilização no modelo, foi adotado o valor inicial de 114.835 habitantes, conforme previsão do IBGE para o ano de 2018, e é descrita pela seguinte equação:

$$\text{População}(t) = 114835 + \int_{t_0}^t \text{Crescimento populacional}(t) dt$$

(9)

Unidade: pessoas

Por se tratar de uma equação que possui uma área de gráfico curva, não simétrica, seu cálculo deve utilizar o conceito da integral, a qual está vinculada ao tempo.

Quantidade coletada per capita

A quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados foi extraída diretamente da previsão obtida pelo PMGIRS e vinculado ao tempo. Para isso, foi utilizada a variável auxiliar com seu subtipo em LOOKUP, conforme a tabela a seguir.

Tabela 06. Dados utilizados na variável LOOKUP para a quantidade coletada per capita

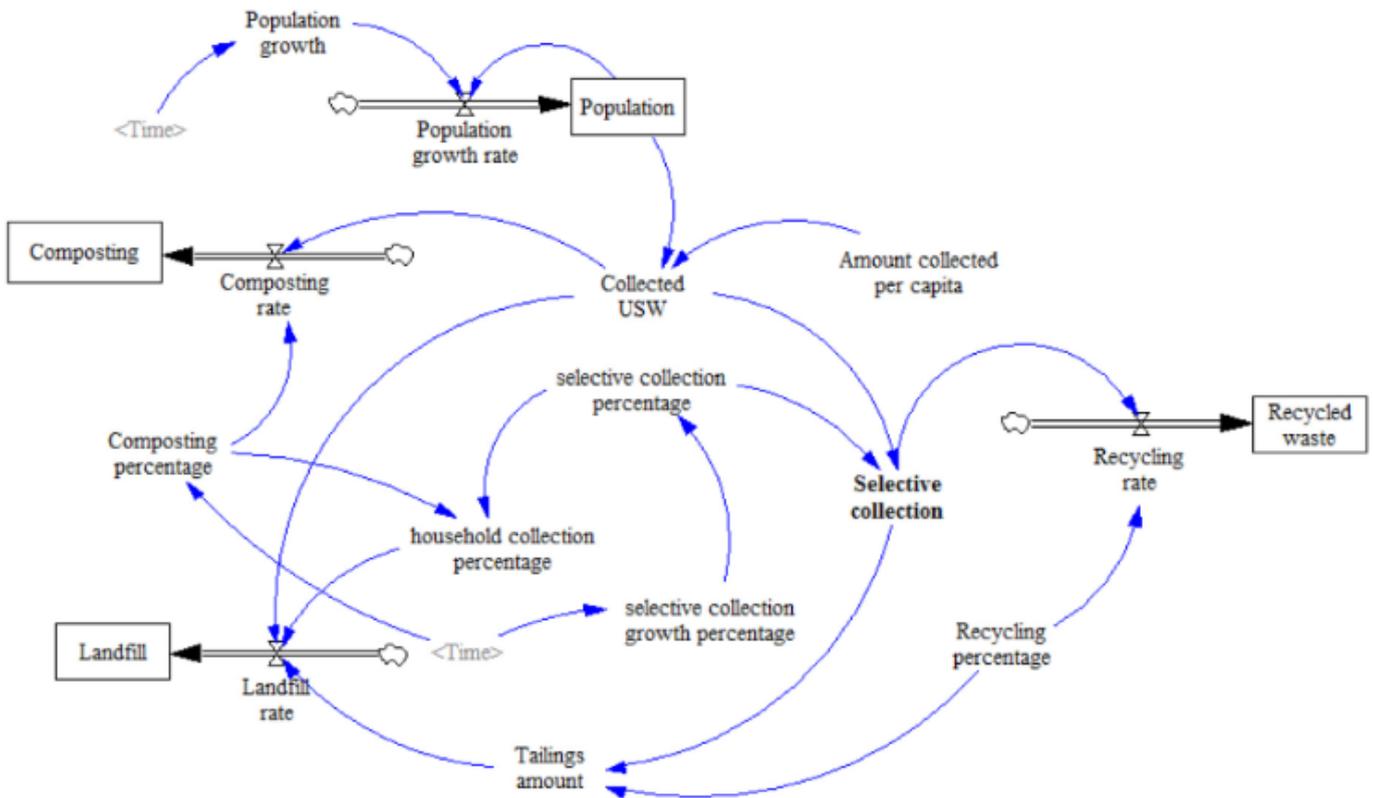
Anos	Ton/pessoa*ano
1	0,27740
2	0,28105
3	0,28105
4	0,28470
5	0,28470
6	0,28835
7	0,28830
8	0,29200
9	0,29200
10	0,29565
11	0,29565
12	0,29570
13	0,29930
14	0,29930
15	0,30295
16	0,30290
17	0,30660
18	0,30660
19	0,31025
20	0,31025

Fonte: elaborada pelo autor

A equação utilizada para a ferramenta VENSIM pode ser visualizada no Apêndice A deste documento.

Diferentemente do modelo proposto por Pinha e Sagawa (2019), nesta equação optou-se pela adoção da auxiliar lookup vinculada ao tempo do modelo, pois os valores da quantidade gerada per capita são conhecidos e foram estimados em todos os anos pelo PMGIRS.

Figura 07. Modelo proposto por Pinha e Sagawa



Fonte: extraído de Pinha e Sagawa (2019)

RSU coletados

Os Resíduo Sólidos Urbanos coletados foram obtidos por meio da multiplicação entre a população do município de Itatiba e a quantidade coletada per capita pelas coletas seletivas e domiciliares comuns, o qual varia em função do tempo, conforme equação a seguir.

$$RSU\ coletados(t) = População(t) \times Quantidade\ coletada\ per\ capita(t)$$

Unidade: toneladas por ano

Taxa de reciclagem

A taxa de reciclagem é uma variável que representa o aumento da quantidade de resíduos sólidos reciclados urbanos coletados por ano e encaminhados para a Cooperativa do município, ou qualquer outro sistema de tratamento desses resíduos. Ela é obtida por meio da multiplicação da porcentagem de aumento da coleta seletiva, pela quantidade de RSU coletados e pela porcentagem de reciclagem. Sua equação está descrita a seguir.

$$\text{Quantidade reciclada}(t) = \frac{\text{Porcentagem de aumento da coleta seletiva} \times \text{RSU coletados}(t)}{\text{Porcentagem de reciclagem}(t)} \quad (10)$$

Unidade: toneladas/ano

Para os cenários 3 e 4, a taxa de reciclagem sofreu alterações de acordo com os cenários previstos pelo PMGIRS. Para os cenários 1 e 2, a taxa de reciclagem não contempla o aumento previsto pelo PMGIRS e, portanto, é influenciado apenas pela geração per capita e pela projeção populacional do município.

Resíduos reciclados

A variável “resíduos reciclados” é calculada em função de uma equação integral pelo tempo e demonstra a quantidade de resíduos que serão reciclados ao passar do tempo. Ela é representada pela equação a seguir.

$$\text{Resíduos reciclados}(t) = \int_{t_0}^t \text{Taxa de reciclagem}(t) dt \quad (11)$$

Unidade: toneladas

Essa auxiliar infere diretamente no potencial de triagem da Cooperativa Reviver e na quantidade potencial de reciclagem no município. Os valores utilizados para a taxa de reciclagem são um reflexo da eficiência da separação de materiais recicláveis pela Cooperativa e foram utilizados como base para a formulação dessa variável.

Porcentagem de reciclagem

A porcentagem de reciclagem foi adicionada ao modelo para servir como uma variável fixa que representa a capacidade de reciclagem da cooperativa do Município com base nos dados fornecidos pelo PMGIRS. Nela, não foi prevista a melhoria do sistema e foi adotado o valor fixo de 66,33%, obtido pela média da porcentagem de resíduos que são triados e comercializados pela Cooperativa. Na tabela 06 a seguir, é demonstrado o valor médio obtido pela triagem dos resíduos recebidos pela Cooperativa e encaminhados para a reciclagem.

Tabela 06. Porcentagem de rejeitos gerados pelo procedimento de separação de resíduos recicláveis na Cooperativa.

	2014	2015	2016	2017	2018
Jan	23	28	43	61	53
Fev	31	25	39	67	36
Mar	23	30	42	65	37
Abr	22	18	38	39	34
Mai	19	23	28	46	24
Jun	30	50	40	37	29
Jul	32	53	17	32	26
Ago	30	43	25	39	39
Set	26	40	27	16	27
Out	19	39	24	28	47
Nov	22	41	33	27	40
Dez	16	39	32	39	22
Média anual	24,42	35,75	32,33	41,33	34,50
Média total	33,67				

Fonte: elaborada pelo autor com as informações obtidas no PMGIRS

Porcentagem de aumento da coleta seletiva

A porcentagem relacionada aos RSU recicláveis representa o aumento da coleta da porcentagem média dos estudos gravimétricos analisados pelo PMGIRS para estes resíduos, em relação ao todo. De acordo com o Plano, o valor adotado para o município de Itatiba foi de 26,9% dos RSU que são recicláveis e, para o modelo, adotou-se os 4,33% com o aumento previsto pelos diferentes cenários, até atingir a marca de 13,45% (50% do total de recicláveis presentes nos RSU).

Sua equação foi formatada utilizando a variável lookup em função do tempo (time) e a adoção das porcentagens supracitadas, para os cenários 3 e 4, conforme a tabela 07 a seguir.

Tabela 07. Tabela LOOKUP utilizado para a Porcentagem de Aumento da Coleta Seletiva

Anos	Porcentagem
0	0,4330
4	0,9530
8	0,1130
20	0,1345

Fonte: elaborada pelo autor

A equação utilizada para a ferramenta VENSIM pode ser visualizada no Apêndice A deste documento.

Quantidade de rejeitos

A quantidade de rejeitos está relacionada à quantidade de resíduos coletados pela coleta seletiva e a porcentagem de rejeitos triados pela Cooperativa Reviver. Sua equação está descrita a seguir.

$$\text{Quantidade de rejeitos}(t) = \text{Taxa de reciclagem} \times (1 - \text{Porcentagem de reciclagem})$$

(12)

Unidade: t/ano

A equação dessa variável não sofreu alterações para os diferentes cenários, mas seu resultado é variado, pois está diretamente ligado com o aumento da coleta seletiva.

Taxa de compostagem

A variável “Taxa de compostagem” está relacionada com o aumento da quantidade da fração orgânica dos RSU encaminhados para a compostagem por ano, vinculada ao tempo e a quantidade de RSU coletados. Ela reflete a quantidade da FORSU coletada que poderá ser encaminhada para compostagem, de acordo com as metas previstas para esses resíduos pelo PMGIRS. Ela está inserida apenas nos cenários 2 e 4, e é descrita conforme equação a seguir.

$$Quantidade(t) = Porcentagem\ relacionada\ aos\ RSU(RSO) \times RSU\ coletados(t) \quad (13)$$

Unidade: toneladas

Compostagem

A “compostagem” é uma variável relacionada a integral da taxa de compostagem, que representa o potencial aumento da destinação final dos RSO para a compostagem ou outro destino final ambientalmente adequado. Sua equação varia em função do tempo e está representada a seguir.

$$Compostagem(t) = \int_{t_0}^t Taxa\ de\ compostagem(t) dt \quad (14)$$

Unidade: toneladas

Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)

A porcentagem relacionada aos RSU (RSO) representa a fração dos Resíduos Sólidos Urbanos coletados que contém os Resíduos Sólidos Orgânicos. Ela foi obtida por meio da utilização da porcentagem média das análises

gravimétricas observadas pelo PMGIRS para estes resíduos. De acordo com o Plano, o valor adotado para o município de Itatiba foi de 52,62% e, para esta modelagem, foi utilizada a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Porcentagem relacionada aos RSU(RSO)} &= (52,62/100) \times \\ \text{Porcentagem de aumento da coleta de RSO}(t) & \end{aligned} \quad (15)$$

Unidade: porcentagem

Porcentagem de aumento da coleta de RSO

A porcentagem de aumento da coleta dos Resíduos Sólidos Orgânicos é uma variável complementar a “Taxa de compostagem” e varia de acordo com o aumento do encaminhamento dos RSO para a compostagem e o tempo. Para isso, foi utilizada a variável auxiliar com seu subtipo em *Lookup*, conforme descrito na tabela 08 a seguir.

Tabela 08. Aumento da porcentagem de RSO coletados prevista

Anos	Porcentagem
0	0
4	0,35
8	0,55
20	0,8

Fonte: elaborada pelo autor

A equação utilizada para a variável *Lookup* na ferramenta VENSIM pode ser visualizada no Apêndice A deste documento.

Porcentagem de coleta de RSU

A porcentagem de coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos está vinculada diretamente à porcentagem de resíduos encaminhados para a compostagem e a porcentagem de resíduos encaminhados para a reciclagem. Sua equação sofreu

alteração para os 4 cenários, pois representa as alterações previstas pelas metas estipuladas no PMGIRS. Ela foi obtida por meio da equação 16 a seguir.

$$\text{Porcentagem de coleta dos RSU}(t) = 1 - (\text{Porcentagem relacionada aos RSU(recicláveis)} + \text{Porcentagem relacionada aos RSU(RSO)}) \quad (16)$$

Unidade: porcentagem

Taxa de aterramento

A variável “Taxa de aterramento” representa o aumento da quantidade de RSU encaminhados para o aterro sanitário do município de Itatiba por ano, como destino final ambientalmente adequado. Sua equação não sofre alteração com os diferentes cenários, mas seu resultado sim. Ela está vinculada diretamente à porcentagem de resíduos que não ficaram retidos nas outras variáveis, somada a quantidade de rejeitos gerados pelo procedimento de triagem do galpão da Cooperativa Reviver. Ela está demonstrada conforme equação a seguir.

$$\text{Quantidade aterrada}(t) = (\text{RSU coletados}(t) \times \text{Porcentagem de coleta de RSU} + \text{Quantidade de rejeitos}) \quad (17)$$

Unidade: toneladas

Aterro

A variável denominada “aterro” representa a soma da quantidade de resíduos que serão aterrados em função do tempo, conforme a equação integral a seguir.

$$\text{Aterro}(t) = - 636233 + \int_{t_0}^t \text{Taxa de aterramento}(t) dt \quad (18)$$

O valor inicial utilizado na equação é de 636.233 toneladas, o que representa a estimativa da vida útil da nova célula do aterro sanitário do município de Itatiba para a quantidade de resíduos que ainda podem ser aterrados, obtido por meio de informações cedidas pela Prefeitura do Município de Itatiba. Para formatação da modelagem matemática proposta o valor utilizado contém o sinal de subtração “-”, de forma a representar em qual ano será esgotada sua vida útil para os diferentes cenários.

4.4.5. Variáveis adaptadas

Para adaptar o modelo para os diferentes cenários, algumas variáveis precisaram sofrer alterações para corresponder aos modelos previstos. Elas podem ser visualizadas na tabela 09 a seguir.

Tabela 09. Principais variáveis alteradas para formatação dos diferentes cenários

Variável	Cenários			
	1	2	3	4
Porcentagem de aumento da coleta seletiva	Valor fixo em 0.0433	Valor fixo em 0.0433	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS
Porcentagem de aumento da coleta de RSO	0	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS	0	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS

Fonte: elaborada pelo autor

A alteração dessas variáveis chaves e a modificação das simulações dentro do software Vensim, possibilitou a formatação dos diferentes cenários propostos por este trabalho e a correspondente análise dos resultados obtidos.

4.4.6. Validação do modelo

A validação da modelagem proposta foi por meio da compilação dos dados relacionados à coleta de RSU para o ano de 2016, pois é a data mais antiga que possui a inclusão de dados no SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre

Saneamento), até o ano de 2019, uma vez que é a data mais recente que possui a inclusão dos dados para a fração orgânica dos RSU e os recicláveis. O modelo da validação seguiu o mesmo adotado para o cenário base com a alteração dos valores e sem as condicionantes propostas pelo PMGIRS para a melhoria da coleta dos recicláveis e da FORSU.

Do SNIS, foram extraídos os seguintes valores para os Resíduos Sólidos Urbanos recicláveis e não recicláveis:

Tabela 10. Valores extraídos da ferramenta SNIS para os RSU para Itatiba

Anos	Domiciliar SNIS (t)	Reciclável SNIS (t)
2016	29857,3	1248,1
2017	30115,9	1999,7
2018	27452,4	1846,8
2019	26708,2	1545,5

Fonte: elaborada pelo autor

Esses valores serviram de referência para validação da modelagem proposta e não houve inclusão para a destinação da Fração Orgânica dos RSU (adotou-se o valor 0), pois a prefeitura não adotou programas para melhoria do sistema de coleta desses materiais.

A população estimada para este ano foi calculada com base no procedimento adotado na modelagem deste trabalho, ou seja, obtendo-se a projeção populacional para o estado de São Paulo e utilizando as equações do método proposto por Madeira e Simões (1972). Dessa forma, obteve-se a seguinte estimativa populacional:

Tabela 11. Valores utilizados para estimativa populacional

Pop. Fed.	Ano	Pop. Mun.	% de crescimento
44760305	2016	118247	0,01665815049
45149603	2017	120114	0,01578888884
45538936	2018	121981	0,01554487209
45919049	2019	123804	0,01494443642

Fonte: elaborada pelo autor

Uma das variáveis chaves na modelagem é a quantidade coletada per capita por ano, a qual foi obtida da seguinte forma:

$$\text{Quantidade coletada per capita por ano} = 0,75 \times 365/1000 = 0,27375 \quad (19)$$

Unidade: toneladas por pessoa por ano

Tabela 12. Valores utilizados para estimativa da taxa de geração per capita

Ano	Pop. Mun. (pessoas)	Taxa geração per capita (kg/hab/ano)	Total gerado per capita/ano (ton/hab/ano)
2016	118247	0,75	0,27375
2017	120114	0,75	0,27375
2018	121981	0,76	0,2774
2019	123804	0,76	0,2774

Fonte: elaborada pelo autor

Das variáveis alteradas para a coleta seletiva, considerou-se os dados fornecidos pelo PMGIRS, com o seguinte valor para os resíduos recebidos pela Cooperativa Reviver:

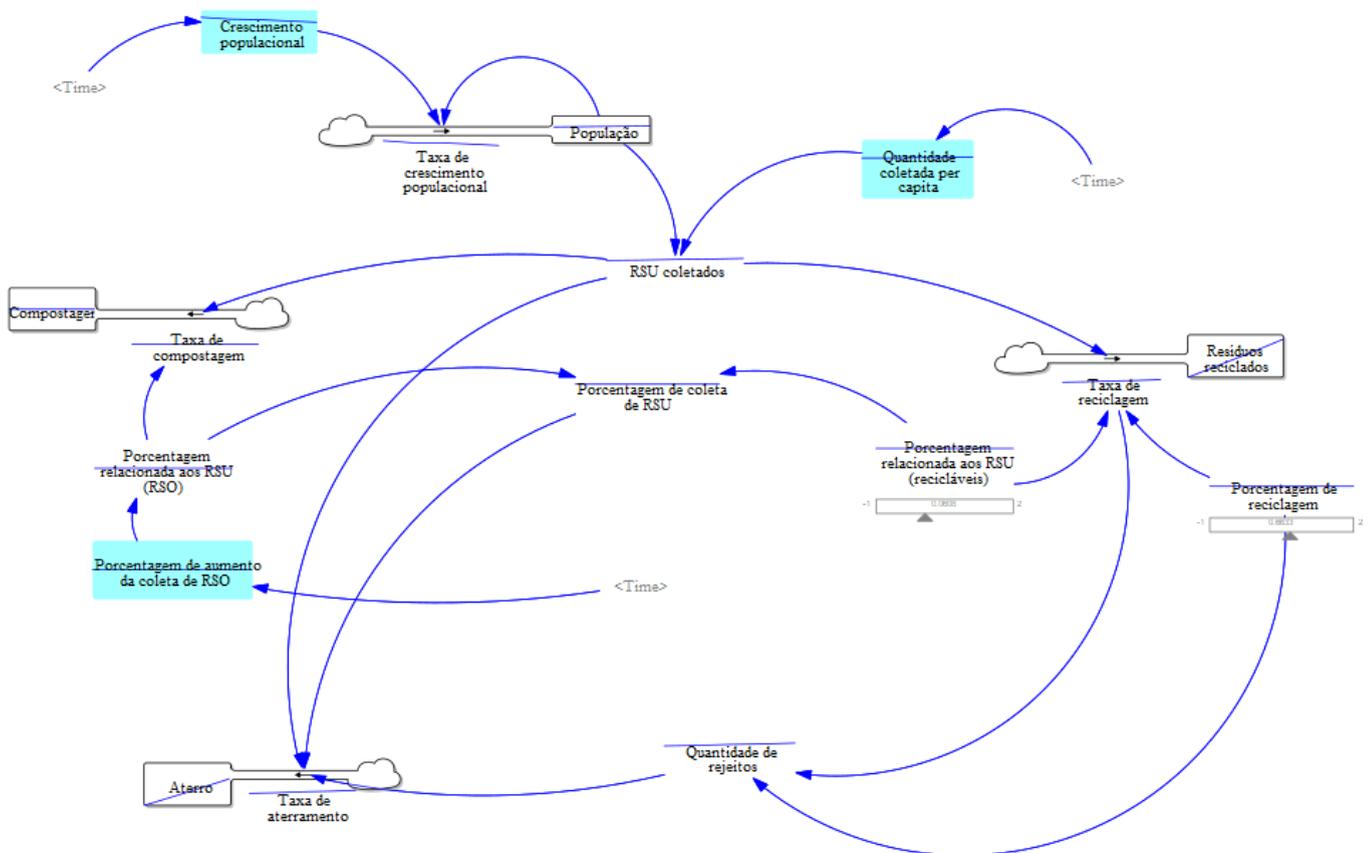
- Porcentagem de reciclagem: 66,33%
- Porcentagem de aumento da coleta seletiva: 0%
- Porcentagem relacionada aos RSU recicláveis: 4,33%

5. Resultados obtidos e discussão

5.1. Validação do modelo

A validação proposta na metodologia deste trabalho corroborou com a obtenção do modelo a seguir:

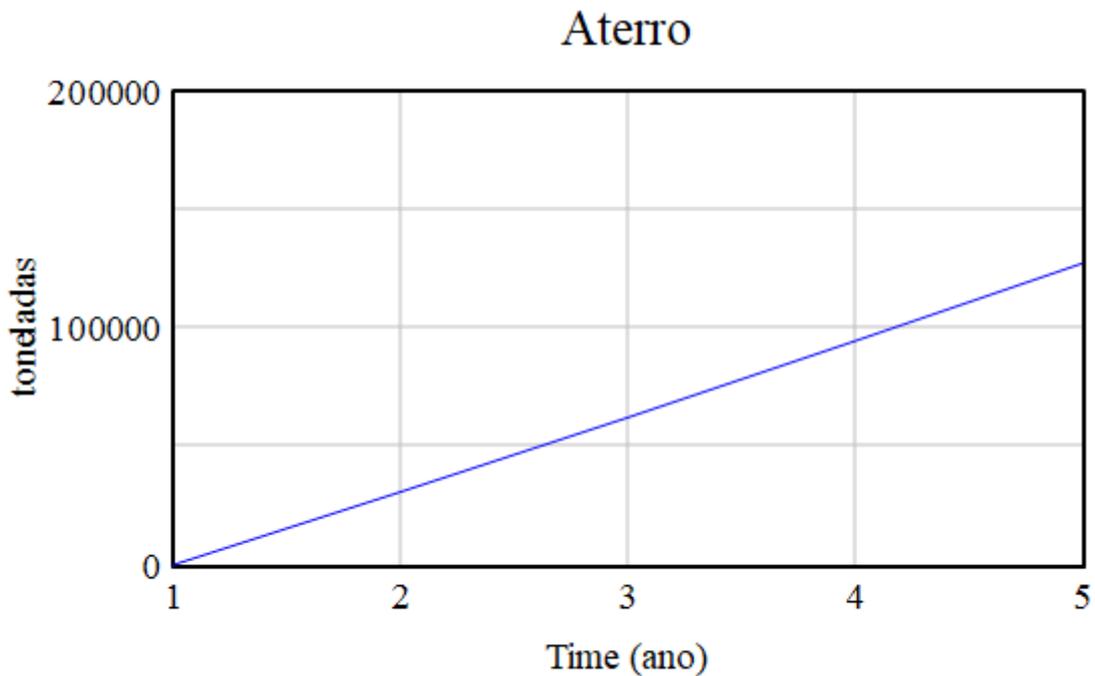
Figura 08. Modelo utilizado na validação



Fonte: elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

Complementarmente, as figuras 09 e 10 a seguir, demonstram o quantitativo obtido para os RSU por meio da simulação do ano de 2016 para 2019.

Figura 09. Variação do recebimento de RSU ao longo do período da validação



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

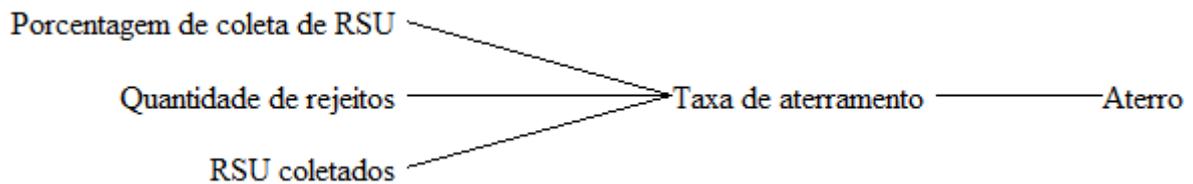
Figura 10. Dados obtidos para o cenário de validação

Time (ano)	"Aterro" Runs: Aterro
1	Validação 0
2	2016-2019 30841.6
3	62196.9
4	94471.9
5	127249

Fonte: elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

As principais variáveis ligadas à quantidade de resíduos encaminhados ao aterro por ano podem ser visualizadas na figura 11 a seguir.

Figura 11. Diagrama causal das principais variáveis vinculadas ao aterro



Fonte: elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

Diante das informações obtidas, foi elaborada a seguinte tabela com a margem de diferença para os valores extraídos do SNIS.

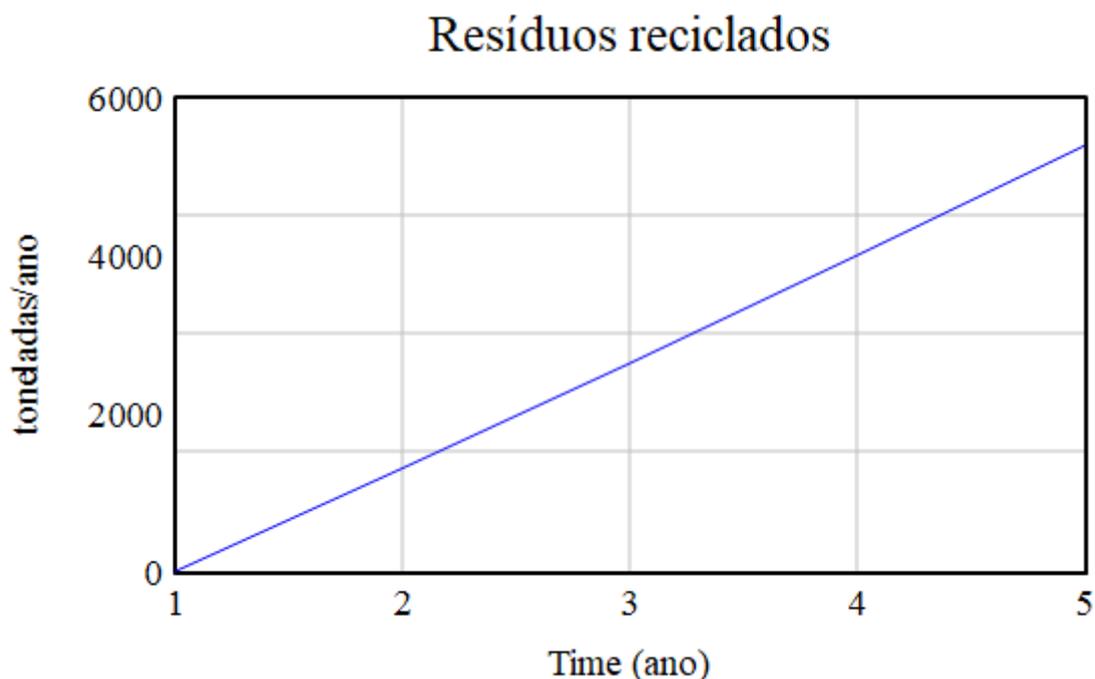
Tabela 13. Tabela referente ao comparativo entre os dados obtidos no SNIS e os dados simulados para os RSU

Anos	Validação 1		
	Domiciliar (SNIS)	Domiciliar (modelo)	Diferença (%)
2016	29857,3	31281,5	4,77
2017	30115,9	31802,6	5,60
2018	27452,4	32332,4	17,78
2019	26708,2	33280,5	24,61

Fonte: elaborada pelo autor

Complementarmente, a geração de resíduos reciclados teve a seguinte resposta no gráfico:

Figura 12. Variação do recebimento de RSU recicláveis ao longo do período da validação



Fonte: elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

Figura 13. Dados obtidos para o cenário de validação

Time (ano)	"Resíduos reciclados"	Resíduos reciclados
1	Runs:	1
2	Validação	1306.44
3	2016-2019	2633.63
4		3999.75
5		5387.11

Fonte: elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

De acordo com a figura 13, verificou-se que a simulação demonstra a somatória dos resíduos encaminhados para a reciclagem ao longo dos respectivos anos. No entanto, os valores das quantidades de resíduos encaminhados para a reciclagem puderam ser obtidos por meio da subtração de um ano pelo outro. Destes, verificou-se que existe um distanciamento relativo dos dados fornecidos pelo SNIS para os resíduos recicláveis, conforme tabela 14 a seguir:

Tabela 14. Tabela referente ao comparativo entre os dados obtidos no SNIS e os dados simulados para os recicláveis

Anos	Validação 1		
	Reciclável (SNIS)	Reciclável (modelo)	Diferença (%)
2016	1248,1	930,699	34,10
2017	1999,7	945,181	111,57
2018	1846,8	960,93	92,19
2019	1545,5	989,12	56,25

Fonte: elaborado pelo autor

Esse distanciamento é notável e não corrobora com a realidade do sistema simulado. De forma a corrigir e aproximar o modelo da realidade, foi realizada uma adequação na porcentagem dos resíduos sólidos recicláveis, uma vez que os valores de 4,33% utilizados se distanciam muito dos valores inseridos no SNIS pela prefeitura. Nesse caso, foi utilizado o valor médio dos dados obtidos da porcentagem da coleta seletiva extraídas do PMGIRS, que foi de 6,086%, conforme tabela 15 a seguir.

Tabela 15. Porcentagem de participação da coleta seletiva e da coleta comum

Coleta Seletiva			Coleta Comum			Total
Ano	Toneladas por ano	%	Ano	Toneladas por ano	%	
2014	1833,69	5,592714456	2014	30953,43	94,40728554	32787,12
2015	2045,22	6,355386691	2015	30135,67	93,64461331	32180,89
2016	2135,07	6,668536503	2016	29882	93,3314635	32017,07
2017	1931,54	6,075786753	2017	29859,24	93,92421325	31790,78
2018	1817,74	5,734499494	2018	29880,58	94,26550051	31698,32
Média	-	6,085384779	-	-	93,91461522	-

Fonte: adaptado do PMGIRS

Os resultados obtidos da correção podem ser consultados nos gráficos e tabela 16 a seguir.

Tabela 16. Tabela referente ao comparativo entre os dados obtidos no SNIS e os dados simulados corrigidos

Anos	Validação 2		
	Reciclável SNIS	Reciclável (modelo)	Diferença (%)
2016	1248,1	1307,73	-4,56
2017	1999,7	1328,5	50,52
2018	1846,8	1350,63	36,74
2019	1545,5	1390,25	11,17

Fonte: Elaborado pelo autor

Diante do exposto, o fator de correção aplicado demonstrou uma maior proximidade da simulação com a realidade, devido a redução da diferença do percentual e, conseqüentemente, foi utilizado como ajuste no cenário base da modelagem para os cenários propostos pelo PMGIRS. A tabela 17 a seguir, demonstra a síntese da variação dos parâmetros com as correções realizadas para as validações.

Tabela 17. Tabela contendo as diferenças para as duas validações e demonstrando a aplicação do fator de correção

Domiciliar comum						
Anos	Validação 1			Validação 2		
	Domiciliar SNIS	Domiciliar (modelo)	Diferença (%)	Domiciliar SNIS	Domiciliar (modelo)	Diferença (%)
2016	29857,3	31281,5	-4,55	29857,3	30840	-3,19
2017	30115,9	31802,6	-5,30	30115,9	31353,8	-3,95
2018	27452,4	32332,4	-15,09	27452,4	31876,1	-13,88
2019	26708,2	33280,5	-19,75	26708,2	32811,1	-18,60
Reciclável						
Anos	Validação 1			Validação 2		
	Reciclável SNIS	Reciclável (modelo)	Diferença (%)	Reciclável SNIS	Reciclável (modelo)	Diferença (%)
2016	1248,1	930,699	34,10	1248,1	1307,73	-4,56
2017	1999,7	945,181	111,57	1999,7	1328,5	50,52
2018	1846,8	960,93	92,19	1846,8	1350,63	36,74
2019	1545,5	989,12	56,25	1545,5	1390,25	11,17

Fonte: elaborada pelo autor

Os dados obtidos corroboraram para a necessidade da alteração da porcentagem de resíduos recicláveis que já são destinados para a coleta seletiva. Além da redução de uma média na diferença porcentual (podendo chegar até 61,05%) para os RSU recicláveis, houve uma redução na diferença nos RSU totais coletados.

Dos resultados obtidos com a validação e seguindo a metodologia proposta por Law e Kelton (1991), adaptada, foi realizada a correção do modelo deste trabalho com a alteração para os valores da coleta de resíduos sólidos recicláveis, conforme tabela 18 a seguir.

Tabela 18. Principais variáveis alteradas para formatação dos diferentes cenários

Variável	Cenários			
	1	2	3	4
Porcentagem de aumento da coleta seletiva	Valor fixo em 0.0609	Valor fixo em 0.0609	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS
Porcentagem de aumento da coleta de RSO	0	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS	0	Aumento da coleta prevista pelo PMGIRS

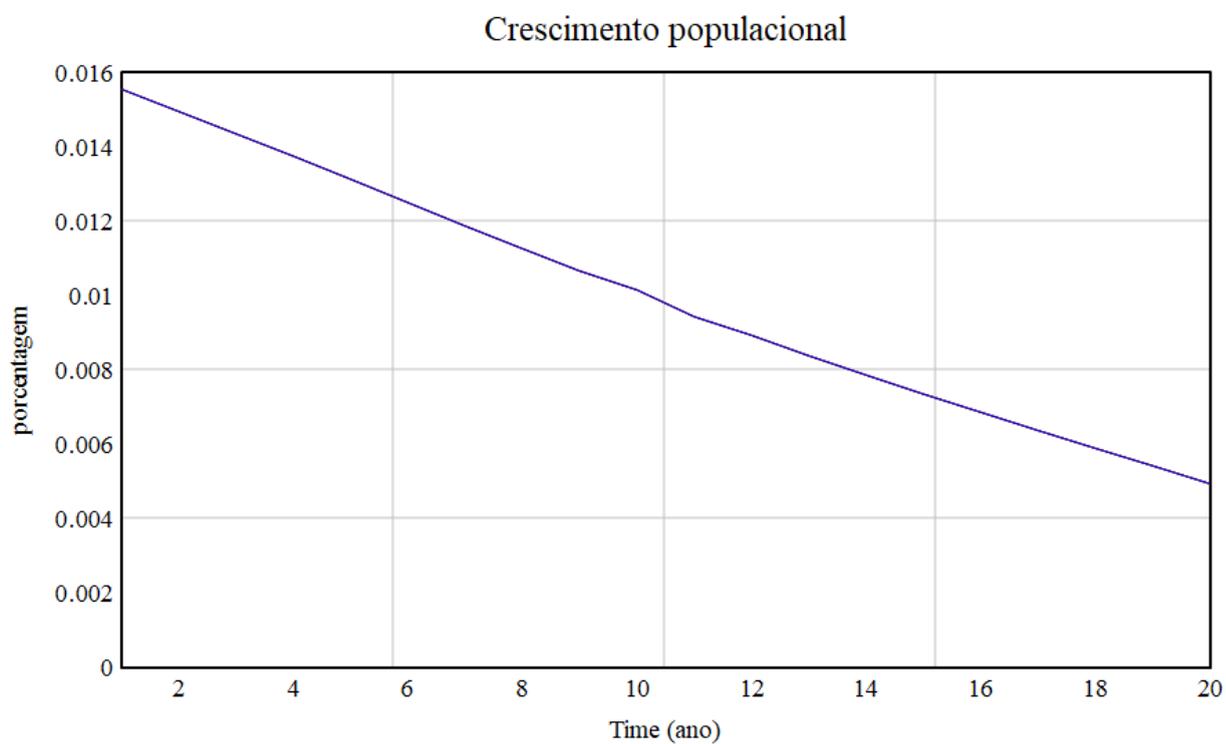
Fonte: elaborada pelo autor

5.2. Variáveis obtidas

Crescimento populacional

Os resultados obtidos para o crescimento populacional representam a aproximação do crescimento previsto para a população estadual, fornecida por meio do IBGE, adaptada para o município, conforme demonstrado na metodologia. Ela está diretamente vinculada com todas as variáveis significativas do modelo, como a quantidade de resíduos reciclados, a quantidade de resíduos encaminhados para a compostagem e a quantidade de resíduos aterrados. O comportamento desta variável pode ser visualizado na figura 14 a seguir.

Figura 14. Gráfico da variação do crescimento populacional ao longo dos anos



Fonte: elaborada pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

O crescimento populacional apresentou um comportamento decrescente com base na metodologia adotada, a qual corrobora com a perspectiva de crescimento populacional da ONU (2019), conforme os valores obtidos na figura 15 a seguir.

Figura 15. Valores obtidos para os diferentes cenários para o crescimento populacional

Time (ano)	"Crescimento populacional"	Crescimento populacional
0		0.01554
1	Runs:	0.01554
2	Cenário final	0.01494
3		0.01434
4		0.01374
5		0.01312
6		0.01249
7		0.01186
8		0.01125
9		0.01065
10		0.01014
11		0.00942
12		0.00892
13		0.00837
14		0.00785
15		0.00734
16		0.00685
17		0.00636
18		0.00588
19		0.00541
20		0.00493

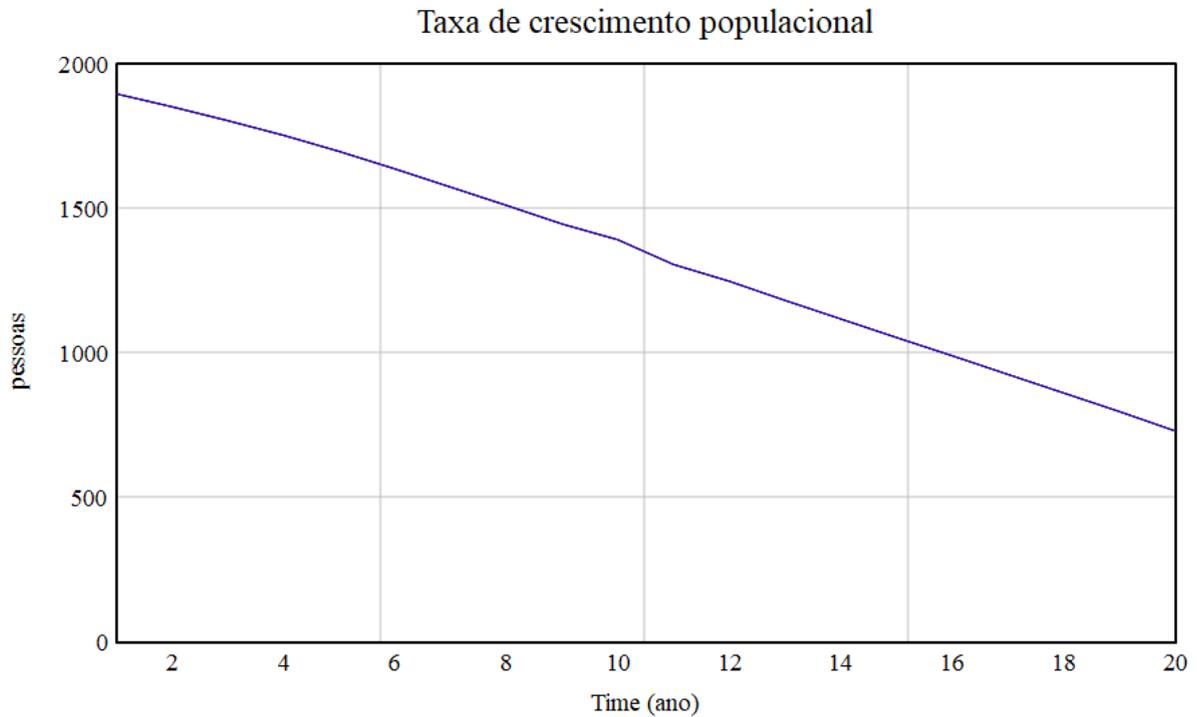
Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Os valores obtidos e a formatação dessa equação foram os mesmos para os diferentes cenários.

Taxa de crescimento populacional

A taxa de crescimento populacional apresentou um comportamento similar ao crescimento populacional, com uma quantidade variando entre 700 a 1900 pessoas ao ano. A mesma está vinculada diretamente à população e ao crescimento populacional e seu valor é maior nos primeiros anos e menor com o passar do tempo.

Figura 16. Crescimento populacional ao longo dos anos para todos os cenários



Fonte: elaborada pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

De acordo com Bonifácio e Guimarães (2021), existe uma tendência na diminuição no acréscimo da população brasileira ao longo dos anos, a qual corrobora com os dados obtidos. Isso, pois a taxa de fecundidade demonstrou ser o parâmetro mais importante e o mais afetado ao longo dos anos. Menos pessoas nascem, ao mesmo tempo que se diminui o número de jovens e aumenta o número de idosos.

Os valores obtidos para a estimativa da taxa de crescimento populacional podem ser verificados na figura 17 a seguir.

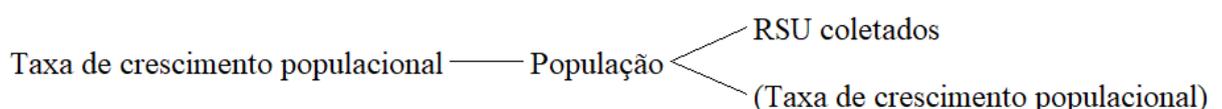
Figura 17. Valores obtidos para os diferentes cenários para o crescimento populacional

Time (ano)	"Taxa de crescimento populacional"	Taxa de crescimento populacional
0		1895.58
1		1925.04
2	Runs:	1879.48
3	Cenário final	1830.95
4		1779.5
5		1722.55
6		1661.35
7		1597.25
8		1533.07
9		1467.63
10		1412.23
11		1325.26
12		1266.74
13		1199.23
14		1134.14
15		1068.78
16		1004.76
17		939.274
18		873.908
19		808.783
20		741.011

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

De acordo com a figura 17, a taxa de crescimento populacional apresenta uma variação notável ao passar dos anos, saindo da máxima de 1925 pessoas para 741, uma redução de 259%. A respectiva variável possui vínculo com as seguintes variáveis:

Figura 18. Vínculo de outras variáveis com a taxa de crescimento populacional



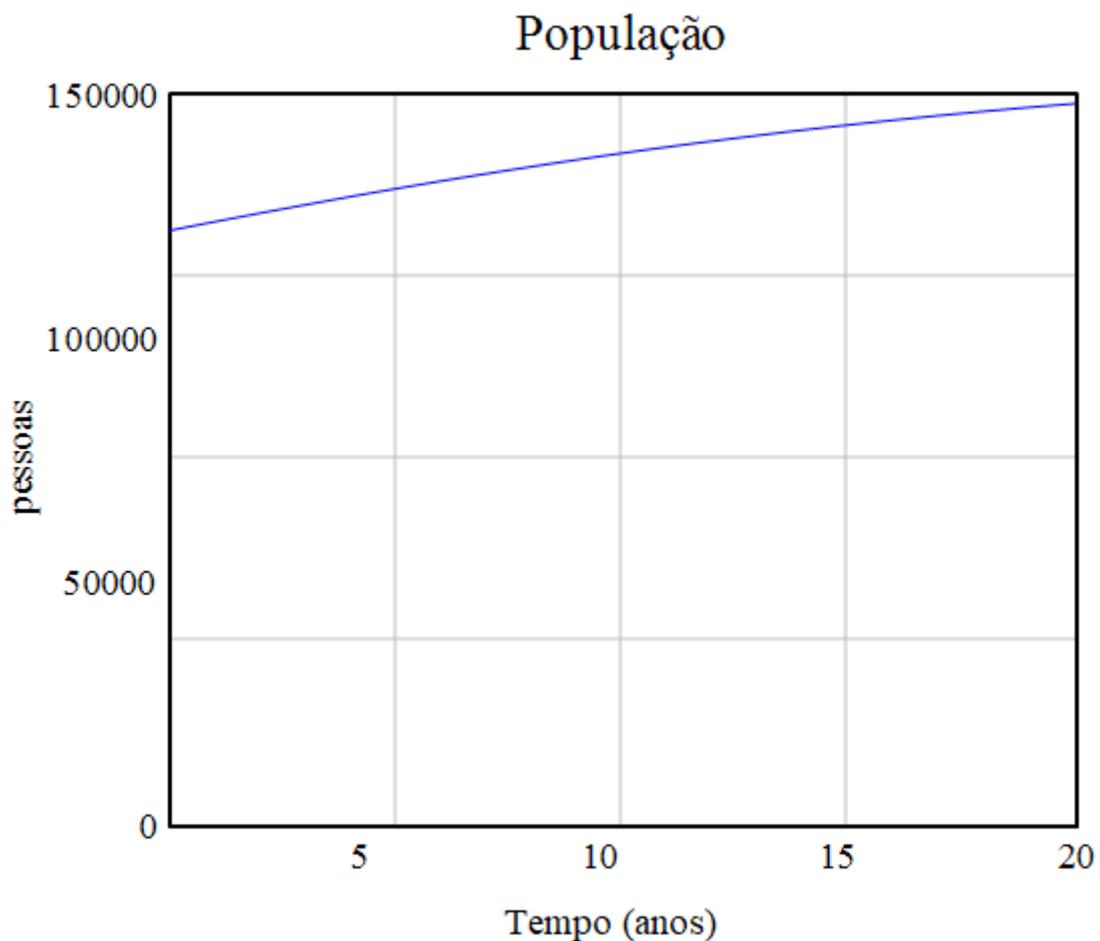
Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Com os resultados obtidos para a respectiva variável, verificou-se uma tendência de crescimento negativo, ou seja, do crescimento da população ao longo dos anos se aproximar do zero e apresentar um comportamento negativo, o qual corrobora com as variáveis obtidas vinculadas.

População

Os resultados obtidos para a variável “população” podem ser verificados nas figuras 19 e 20 a seguir.

Figura 19. Variação da população ao longo do tempo



Fonte: elaborada pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

De acordo com a estimativa da população, ao passar de 20 anos, o número de moradores do Município será de 150.307 pessoas, um aumento de 123,22%, conforme figura 20 a seguir.

Figura 20. Valores obtidos para a variável população

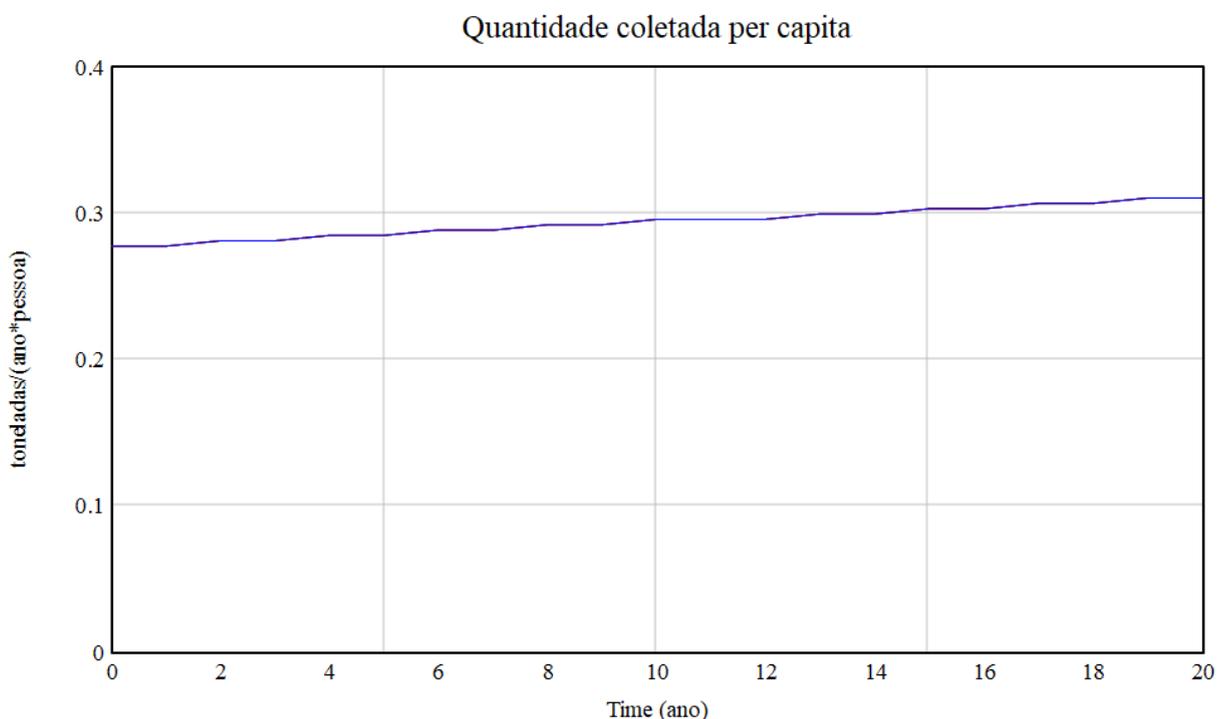
Time (ano)	"População"	População
0	Runs:	121981
1	Cenário final	123877
2		125802
3		127681
4		129512
5		131292
6		133014
7		134675
8		136273
9		137806
10		139273
11		140686
12		142011
13		143278
14		144477
15		145611
16		146680
17		147685
18		148624
19		149498
20		150307

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Quantidade coletada per capita

A quantidade coletada per capita obtida reflete a quantidade de resíduos gerados por ano por pessoa. Conforme a figura 21 a seguir, ela apresenta um comportamento linear crescente e é influenciada diretamente pelo tempo e por fatores sócio-econômicos do Município.

Figura 21. Variação da quantidade coletada per capita ao longo do tempo



Fonte: elaborada pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

Conforme descrito na metodologia, a quantidade coletada per capita teve como base o levantamento da quantidade de RSU gerados pelo Município de Itatiba, descritos no PMGIRS. A unidade utilizada foi a quantidade de toneladas geradas por ano e por pessoa, de forma a possibilitar o enquadramento das unidades dentro do modelo. Na Figura 22 a seguir, pode-se verificar a evolução da quantidade coletada per capita ao longo dos anos.

Figura 22. Valores obtidos para a variável quantidade coletada per capita em toneladas por ano

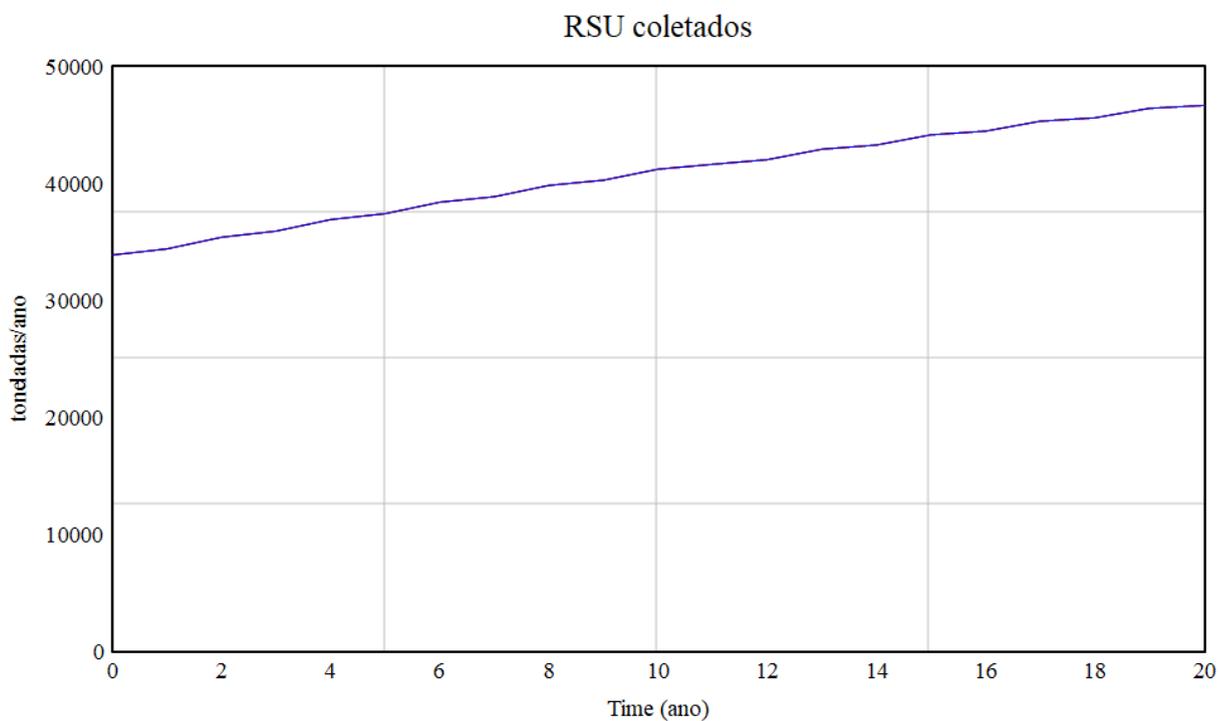
Time (ano)	"Quantidade coletada per capita" Runs: Cenário final	Quantidade coletada per capita
0		0.2774
1		0.2774
2		0.28105
3		0.28105
4		0.2847
5		0.2847
6		0.28835
7		0.2883
8		0.292
9		0.292
10		0.29565
11		0.29565
12		0.2957
13		0.2993
14		0.2993
15		0.30295
16		0.3029
17		0.3066
18		0.3066
19		0.31025
20		0.31025

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

RSU coletados

Da mesma forma que as variáveis supracitadas, a quantidade de RSU coletados não possui alteração para os diferentes cenários e, portanto, foi tratada como apenas uma simulação. Apesar da redução do crescimento populacional, a respectiva variável demonstra uma constância de crescimento, provavelmente por estar vinculada aos fatores econômicos e a composição dos resíduos da população. A figura 23 a seguir demonstra o gráfico obtido para a modelagem proposta.

Figura 23. Representação gráfica da quantidade de RSU coletada em função do tempo



Fonte: elaborado pelo autor utilizando a ferramenta Vensim

Os valores obtidos representam a quantidade de RSU coletado por tonelada por ano para o Município de Itatiba e estão demonstrados na figura 24 a seguir.

Figura 24. Valores obtidos com a variação da taxa de reciclagem ao longo dos anos

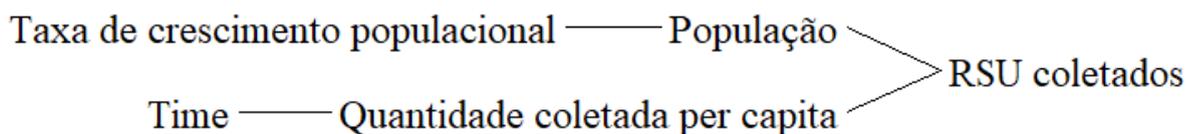
Time (ano)	"RSU coletados" Runs: Cenário final	RSU coletados
0		33837.5
1		34363.4
2		35356.5
3		35884.8
4		36872.1
5		37378.7
6		38354.6
7		38826.9
8		39791.6
9		40239.3
10		41176.2
11		41593.7
12		41992.6
13		42883
14		43241.9
15		44112.8
16		44429.3
17		45280.1
18		45568.1
19		46381.7
20		46632.6

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

De acordo com a figura 24, verificou-se um aumento considerável de 37,81% dos RSU gerados e coletados em Itatiba, resultado do crescimento populacional ao longo de 20 anos.

A figura 25 a seguir, demonstra os principais vínculos da variável com as outras do sistema.

Figura 25. Principais variáveis vinculadas aos RSU coletados

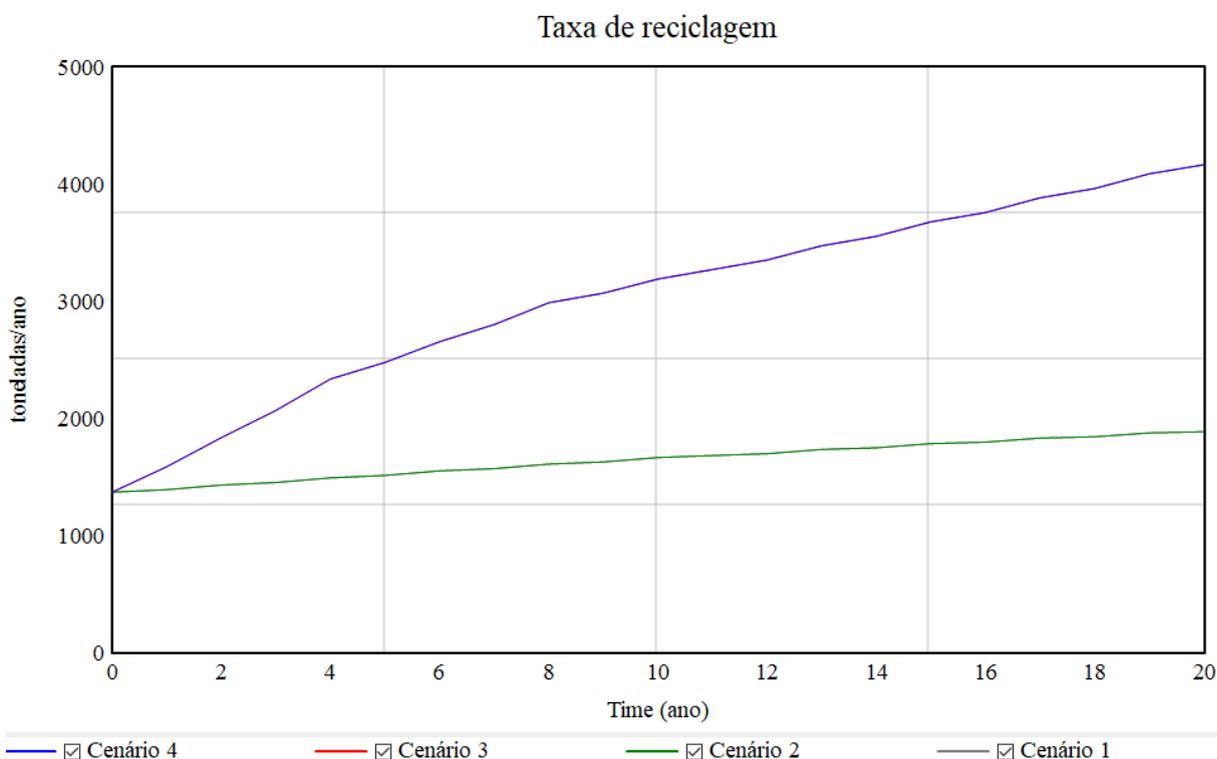


Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Taxa de reciclagem

Os resultados obtidos para a variável “Taxa de reciclagem” demonstram a quantidade de resíduos recicláveis coletados por ano (em toneladas) e não possuem alteração para os cenários 1 e 3 (representados pela linha azul) e uma variação crescente para os cenários 2 e 4 (representados pela linha verde).

Figura 26. Representação gráfica da taxa de reciclagem ao longo dos anos



Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Os valores obtidos pela simulação podem ser visualizados na figura 27 a seguir. Verificou-se a diferença expressiva quando da aplicação das ações de aumento da coleta seletiva no município, com a expectativa de atingir a marca de 4.160 toneladas de resíduos reciclados coletados.

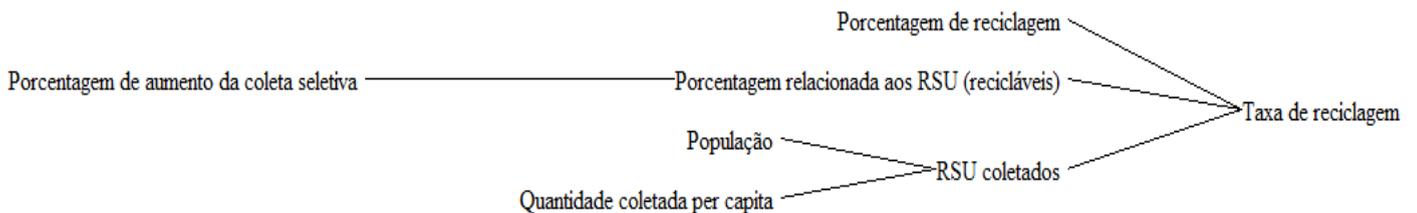
Figura 27. valores obtidos para a taxa de reciclagem ao longo dos anos

Time (ano)	"Taxa de reciclagem"	Taxa de reciclagem			
0		1364.62	1364.62	1364.62	1364.62
1	Runs:	1582.42	1582.42	1385.83	1385.83
2	Cenário 4	1830.43	1830.43	1425.88	1425.88
3	Cenário 3.vdfx	2063.07	2063.07	1447.18	1447.18
4	Cenário 2.vdfx	2330.78	2330.78	1487	1487
5	Cenário 1.vdfx	2472.51	2472.51	1507.43	1507.43
6		2649.64	2649.64	1546.79	1546.79
7		2796.23	2796.23	1565.84	1565.84
8		2982.5	2982.5	1604.74	1604.74
9		3063.87	3063.87	1622.8	1622.8
10		3184.14	3184.14	1660.58	1660.58
11		3265.86	3265.86	1677.42	1677.42
12		3347.09	3347.09	1693.51	1693.51
13		3469.02	3469.02	1729.41	1729.41
14		3549.44	3549.44	1743.89	1743.89
15		3673.36	3673.36	1779.01	1779.01
16		3752.51	3752.51	1791.77	1791.77
17		3878.18	3878.18	1826.08	1826.08
18		3956.99	3956.99	1837.7	1837.7
19		4082.77	4082.77	1870.51	1870.51
20		4160.27	4160.27	1880.63	1880.63

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

De acordo com a figura acima, verificou-se que no primeiro ano não ocorreu a alteração de valores para a taxa de reciclagem em todos os cenários e a evolução notável ocorre apenas nos cenários 3 e 4. Os cenários 1 e 2 possuem um aumento na quantidade de resíduos encaminhados para a reciclagem, pois a variável está vinculada às variáveis de população e geração de resíduos, o que corrobora com o modelo elaborado, conforme a figura 28 a seguir.

Figura 28. Variáveis vinculadas a Porcentagem de aumento da coleta seletiva

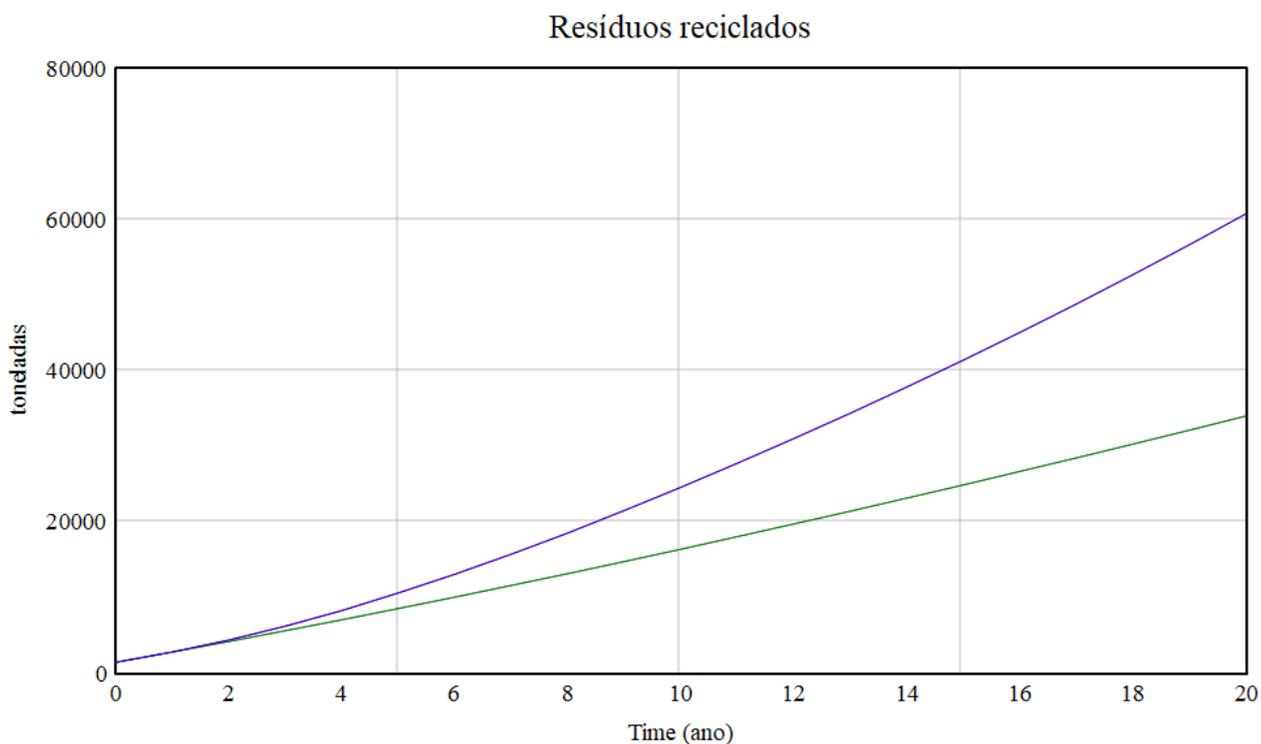


Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Resíduos reciclados

A variável obtida para os resíduos reciclados demonstra a soma das quantidades anuais de resíduos encaminhados para a reciclagem por ano. O gráfico obtido pode ser visualizado na figura 29 a seguir.

Figura 29. Valores obtidos para a taxa de reciclagem ao longo dos anos



Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Os resultados obtidos pela modelagem para os diferentes cenários da coleta seletiva, demonstraram uma tendência linear do aumento dos resíduos coletados com o passar dos anos para os cenários 1 e 2, fruto do aumento da geração per capita e da população. Sua equação está diretamente vinculada a estas duas variáveis e, portanto, apresenta um comportamento linear. Para os outros cenários, a tendência é um pico de crescimento até o alcance da porcentagem máxima prevista pelo PMGIRS e, após, um comportamento linear crescente.

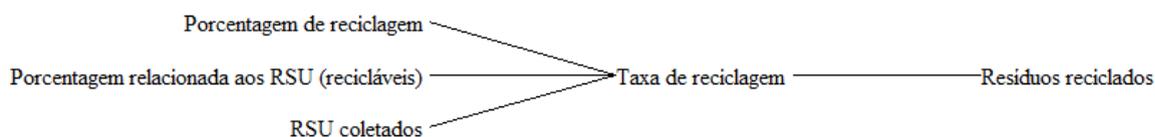
Figura 30. Valores obtidos para os resíduos reciclados ao longo dos anos

Time (ano)	"Resíduos reciclados"	Resíduos reciclados			
0		1373.66	1373.66	1373.66	1373.66
1	Runs:	2738.28	2738.28	2738.28	2738.28
2	Cenário 4	4320.7	4320.7	4124.11	4124.11
3	Cenário 3.vdfx	6151.13	6151.13	5549.99	5549.99
4	Cenário 2.vdfx	8214.2	8214.2	6997.17	6997.17
5	Cenário 1.vdfx	10545	10545	8484.18	8484.18
6		13017.5	13017.5	9991.61	9991.61
7		15667.1	15667.1	11538.4	11538.4
8		18463.4	18463.4	13104.2	13104.2
9		21445.9	21445.9	14709	14709
10		24509.7	24509.7	16331.8	16331.8
11		27693.9	27693.9	17992.4	17992.4
12		30959.7	30959.7	19669.8	19669.8
13		34306.8	34306.8	21363.3	21363.3
14		37775.8	37775.8	23092.7	23092.7
15		41325.3	41325.3	24836.6	24836.6
16		44998.6	44998.6	26615.6	26615.6
17		48751.1	48751.1	28407.4	28407.4
18		52629.3	52629.3	30233.4	30233.4
19		56586.3	56586.3	32071.1	32071.1
20		60669.1	60669.1	33941.6	33941.6

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

De acordo com os dados obtidos, verificou-se um aumento de 78,74% na quantidade de resíduos reciclados ao longo de 20 anos. A figura 31 a seguir, demonstra o vínculo da respectiva variável com as outras do sistema, as quais a afetarão diretamente.

Figura 31. Variáveis vinculadas aos Resíduos Reciclados

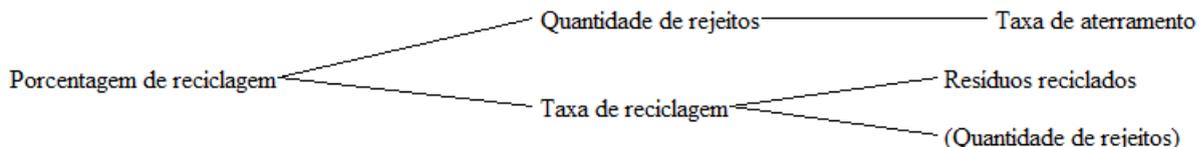


Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Porcentagem de reciclagem

Para a porcentagem de reciclagem adotou-se o valor fixo de 66,33%, obtido pela média de triagem da Cooperativa Reviver para os anos de 2014 a 2018. Não houve alterações para esse parâmetro, pois o mesmo é dependente do processo da associação dos cooperados e de diversos fatores, como número de funcionários, valor de mercado, sistema de coleta seletiva, sazonalidade do comércio, eficiência dos cooperados, entre outros. A seguir, é possível visualizar o vínculo desta variável com as outras do sistema.

Figura 32. Variáveis vinculadas à Porcentagem de reciclagem

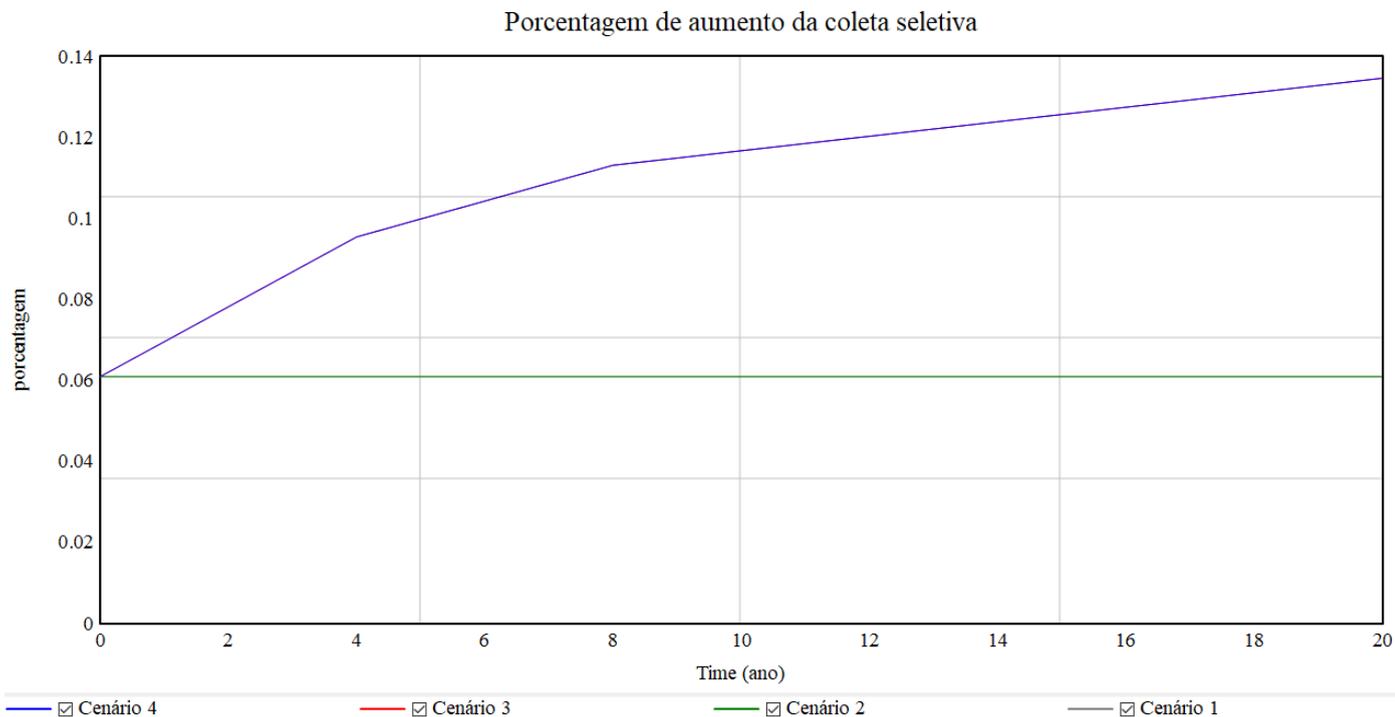


Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Porcentagem de aumento da coleta seletiva

A porcentagem de aumento da coleta seletiva foi tratada como a porcentagem do total de resíduos reciclados presentes na coleta dos RSU e não a porcentagem do aumento da coleta para estes materiais, em específico. No caso, adotou-se o valor base de 6,08% com o aumento previsto pelos cenários que prevêem a melhoria do sistema, sendo 9,53% após 4 anos (37% dos 26,9%), 11,3% (42% dos 26,9%) e 13,45% (50% dos 26,9%). O gráfico e os dados obtidos podem ser visualizados nas figuras 33 e 34 a seguir.

Figura 33. Gráfico obtido para a “Porcentagem de aumento da coleta seletiva”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Conforme demonstrado no gráfico acima, os cenários 3 e 4 (linha azul) apresentam crescimento de acordo com as metas estabelecidas pelo PMGIRS e os cenários 1 e 2 (linha verde) são valores constantes de 6,08%. A respectiva variável afeta diretamente a “Porcentagem de coleta de RSU”.

Para os cenários 3 e 4, é possível verificar o comportamento do crescimento da porcentagem relacionada ao aumento da coleta destes materiais, conforme figura 34 a seguir.

Figura 34. Variação da “Porcentagem de aumento da coleta seletiva” ao longo dos anos

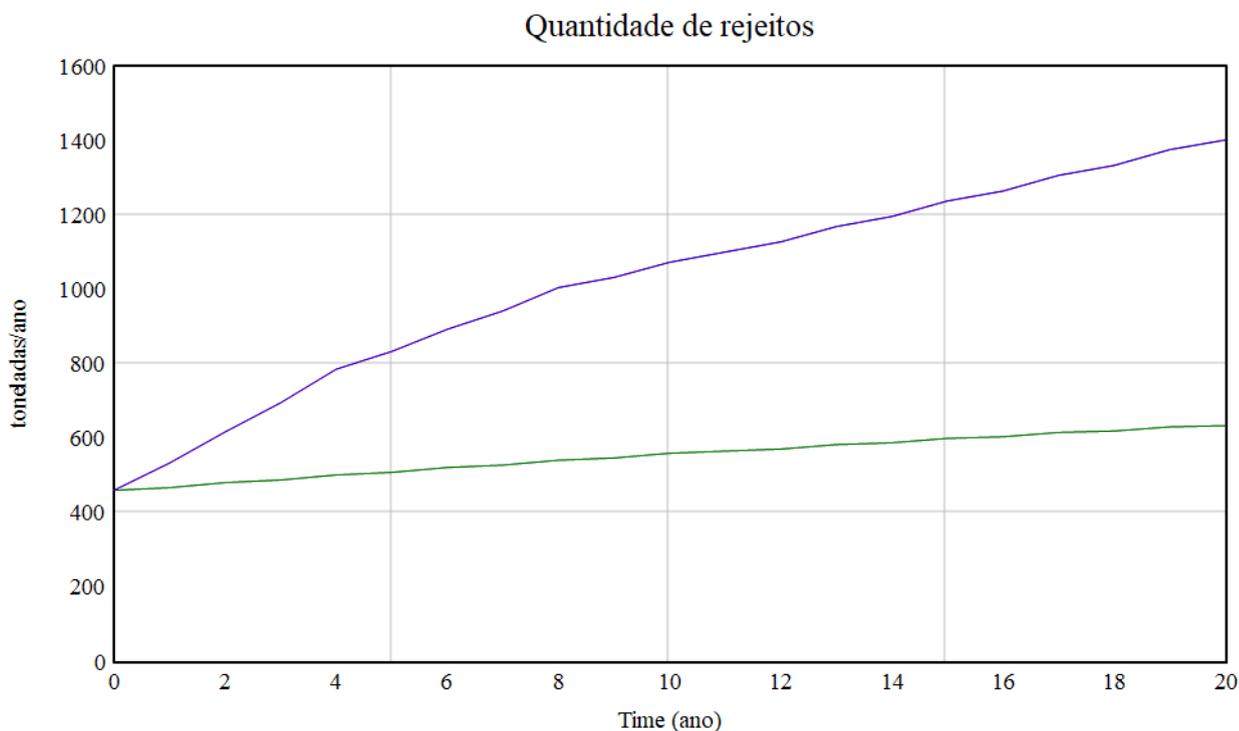
Time (ano)	"Porcentagem de aumento da coleta seletiva"	0.0608	0.0608	0.0608	0.0608
0	de aumento	0.0608	0.0608	0.0608	0.0608
1	da coleta	0.069425	0.069425	0.0608	0.0608
2	seletiva"	0.07805	0.07805	0.0608	0.0608
3	Runs:	0.086675	0.086675	0.0608	0.0608
4	Cenário 4	0.0953	0.0953	0.0608	0.0608
5	Cenário 3.vdfx	0.099725	0.099725	0.0608	0.0608
6	Cenário 2.vdfx	0.10415	0.10415	0.0608	0.0608
7	Cenário 1.vdfx	0.108575	0.108575	0.0608	0.0608
8		0.113	0.113	0.0608	0.0608
9		0.114792	0.114792	0.0608	0.0608
10		0.116583	0.116583	0.0608	0.0608
11		0.118375	0.118375	0.0608	0.0608
12		0.120167	0.120167	0.0608	0.0608
13		0.121958	0.121958	0.0608	0.0608
14		0.12375	0.12375	0.0608	0.0608
15		0.125542	0.125542	0.0608	0.0608
16		0.127333	0.127333	0.0608	0.0608
17		0.129125	0.129125	0.0608	0.0608
18		0.130917	0.130917	0.0608	0.0608
19		0.132708	0.132708	0.0608	0.0608
20		0.1345	0.1345	0.0608	0.0608

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Quantidade de rejeitos

A quantidade de rejeitos está diretamente vinculada a coleta seletiva, a taxa de reciclagem e a porcentagem de reciclagem. Quanto maior for a quantidade de resíduos coletados pela coleta seletiva e pior a qualidade dos resíduos recebidos pelo galpão, maior a quantidade de rejeitos. Define-se pior qualidade de resíduos a presença de RSU que não fazem parte dos recicláveis, como rejeitos e orgânicos. De acordo com a figura 35 a seguir e com os cenários simulados, a quantidade de rejeitos tem um maior aumento nos primeiros 4 anos para os cenários 3 e 4 (linha azul), devido a meta de curto prazo de 37% (9,53% do total de RSU) no aumento dos recicláveis coletados, e um aumento gradual nos próximos 16 anos. Para os cenários 1 e 2 (linha verde), a quantidade de rejeitos possui um crescimento linear, pois foi utilizada uma constante na variável do aumento da coleta seletiva.

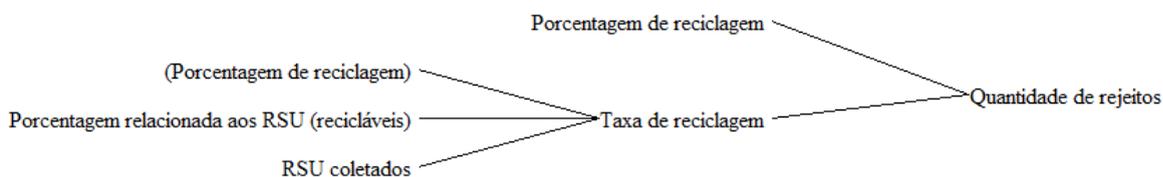
Figura 35. Gráfico obtido para a simulação da quantidade de rejeitos gerados pelo processo da Cooperativa Reviver



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Essa variável possui vínculo direto com a “Porcentagem de reciclagem” e a “Taxa de reciclagem”, uma vez que a alteração dos valores de ambas irá alterar seu valor final, conforme figura 36 a seguir.

Figura 36. Variáveis vinculadas à Quantidade de rejeitos



Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Diante do exposto e considerando as alterações previstas para os cenários da coleta seletiva, verificou-se um crescimento expressivo na quantidade de rejeitos

encaminhados ao aterro sanitário, com um aumento de 121,26% em 20 anos, quando comparado ao cenário base.

Figura 37. Variação da quantidade de rejeitos gerados pelo processo da Cooperativa

Time (ano)	"Quantidade de rejeitos"	Quantidade de rejeitos			
0		459.468	459.468	459.468	459.468
1	Runs:	532.801	532.801	466.608	466.608
2	Cenário 4	616.305	616.305	480.094	480.094
3	Cenário 3.vdfox	694.636	694.636	487.267	487.267
4	Cenário 2.vdfox	784.772	784.772	500.673	500.673
5	Cenário 1.vdfox	832.495	832.495	507.552	507.552
6		892.134	892.134	520.804	520.804
7		941.491	941.491	527.217	527.217
8		1004.21	1004.21	540.317	540.317
9		1031.61	1031.61	546.395	546.395
10		1072.1	1072.1	559.117	559.117
11		1099.62	1099.62	564.786	564.786
12		1126.96	1126.96	570.203	570.203
13		1168.02	1168.02	582.293	582.293
14		1195.1	1195.1	587.167	587.167
15		1236.82	1236.82	598.993	598.993
16		1263.47	1263.47	603.29	603.29
17		1305.78	1305.78	614.843	614.843
18		1332.32	1332.32	618.753	618.753
19		1374.67	1374.67	629.801	629.801
20		1400.76	1400.76	633.208	633.208

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

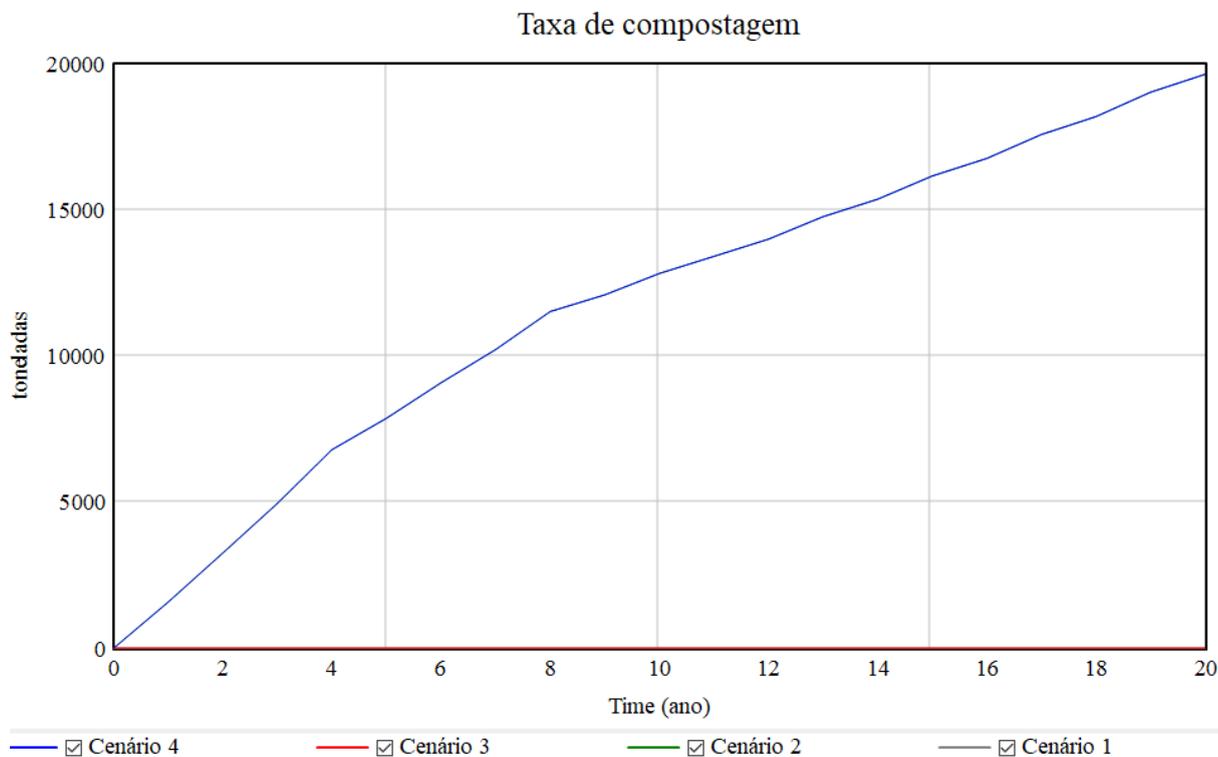
Conforme a figura 37 acima, o valor inicial da quantidade de rejeitos de 459,468 toneladas para todos os cenários, corresponde ao valor inicial de 1373,66 toneladas, adotadas para os resíduos que foram reciclados em 2018 (extraído do PMGIRS). Este valor pode ser obtido pela multiplicação de 33,67% ao valor inicial, fruto da porcentagem de rejeitos que são encaminhados para a Cooperativa.

Taxa de compostagem

A respectiva variável corresponde a soma do aumento da quantidade da fração orgânica dos RSU encaminhados para outro destino que não seja o aterramento dos materiais. Nos modelos propostos, adotou-se “compostagem” como

uma das destinações previstas para estes resíduos. A figura 38 a seguir demonstra o comportamento de crescimento para a “Taxa de compostagem”.

Figura 38. Gráfico obtido para a simulação da taxa de compostagem



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

A figura 39 a seguir demonstra os valores obtidos para os diferentes cenários. Para os cenários 1 e 3 (linha vermelha) verificou-se a nulidade de valores, uma vez que não existem políticas públicas de coleta e destinação para estes materiais e, para os cenários 2 e 4 (linha azul), o crescimento corresponde ao aumento previsto para a coleta destes materiais.

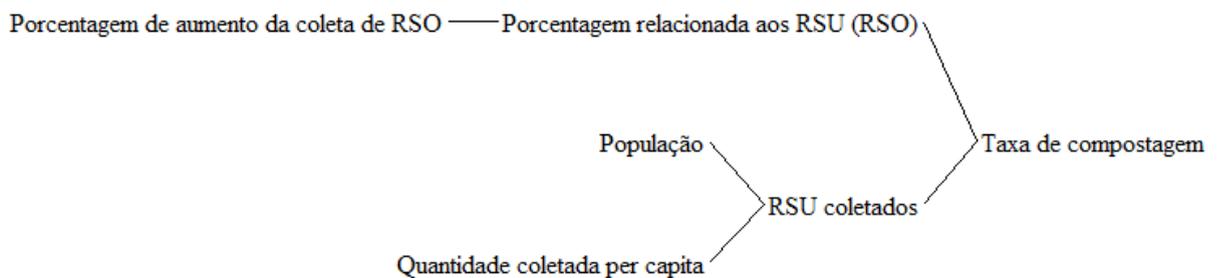
Figura 39. Variação da quantidade de rejeitos gerados pelo processo da Cooperativa

Time (ano)	"Taxa de compostagem	Taxa de compostagem	0	0	0
0	compostagem	0	0	0	0
1	" Runs:	1582.18	0	1582.18	0
2	Cenário 4	3255.81	0	3255.81	0
3	Cenário 3.vdfx	4956.67	0	4956.67	0
4	Cenário 2.vdfx	6790.73	0	6790.73	0
5	Cenário 1.vdfx	7867.47	0	7867.47	0
6		9081.99	0	9081.99	0
7		10215.4	0	10215.4	0
8		11516.1	0	11516.1	0
9		12086.8	0	12086.8	0
10		12819.6	0	12819.6	0
11		13405.5	0	13405.5	0
12		13994.5	0	13994.5	0
13		14761.3	0	14761.3	0
14		15358.9	0	15358.9	0
15		16151.8	0	16151.8	0
16		16754.7	0	16754.7	0
17		17572	0	17572	0
18		18183.3	0	18183.3	0
19		19016.4	0	19016.4	0
20		19630.5	0	19630.5	0

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

A figura 40 demonstra as variáveis que possuem vínculo direto e indireto com a "Taxa de compostagem".

Figura 40. Variáveis vinculadas à Taxa de compostagem

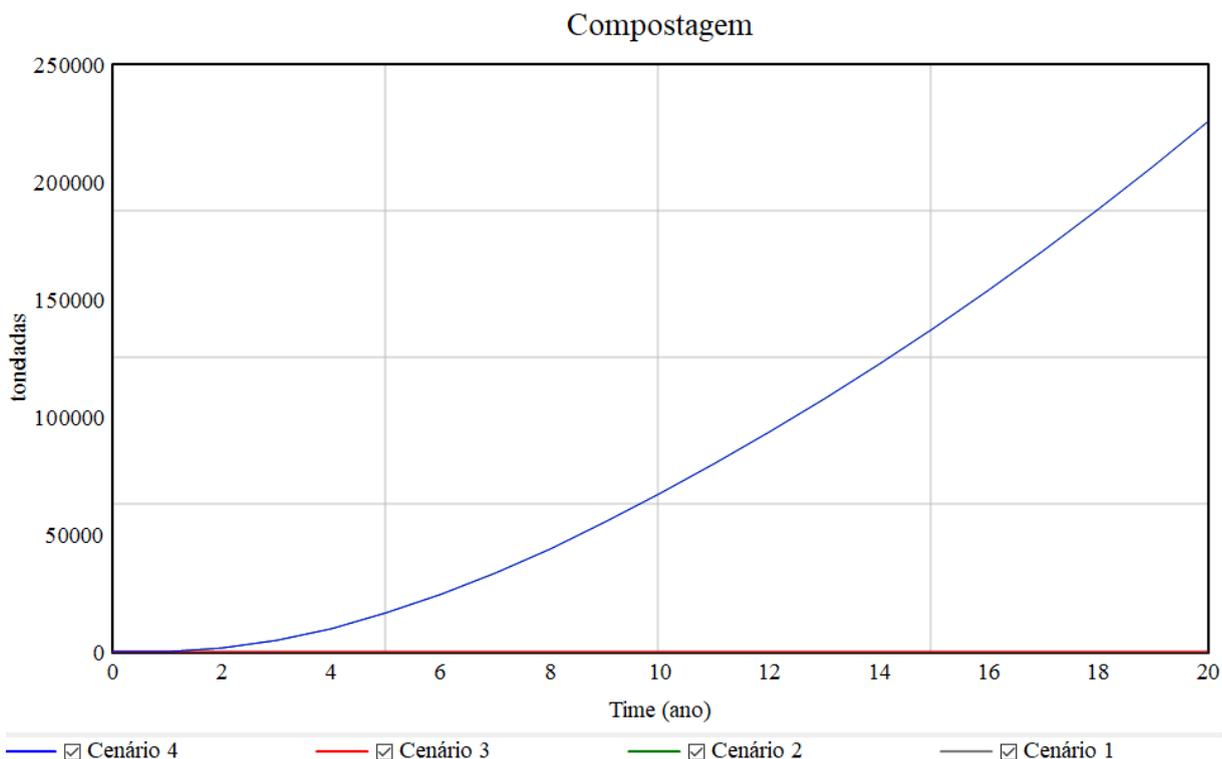


Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Compostagem

A variável “Compostagem” é similar a dos “Resíduos reciclados” e representa a soma da fração orgânica dos RSU encaminhados para um destino final ambientalmente adequado. A figura 41 a seguir, demonstra um crescimento exponencial para os cenários 2 e 4 e o valor nulo para os 1 e 3.

Figura 41. gráfico obtido para a simulação da taxa de compostagem



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Os valores obtidos para a modelagem desta variável podem ser visualizados na figura 42.

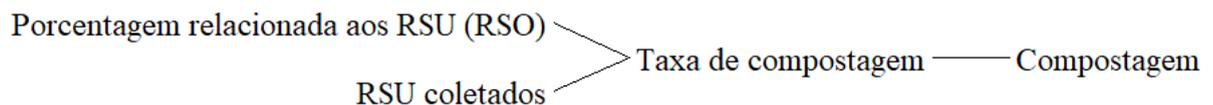
Figura 42. Resultados obtidos para a variável “Compostagem”

Time (ano)	"Compostage m" Runs:	Compostagem			
0	0	0	0	0	0
1	Cenário 4	0	0	0	0
2	Cenário 3.vdfox	1582.18	0	1582.18	0
3	Cenário 2.vdfox	4837.98	0	4837.98	0
4	Cenário 1.vdfox	9794.66	0	9794.66	0
5		16585.4	0	16585.4	0
6		24452.9	0	24452.9	0
7		33534.8	0	33534.8	0
8		43750.2	0	43750.2	0
9		55266.3	0	55266.3	0
10		67353.1	0	67353.1	0
11		80172.7	0	80172.7	0
12		93578.2	0	93578.2	0
13		107573	0	107573	0
14		122334	0	122334	0
15		137693	0	137693	0
16		153845	0	153845	0
17		170599	0	170599	0
18		188171	0	188171	0
19		206355	0	206355	0
20		225371	0	225371	0

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

De acordo com a figura acima, verificou-se uma coleta expressiva destes materiais, principalmente nos últimos anos, com a coleta de 19.016 toneladas de 19 para 20 anos. A figura 43 a seguir demonstra as principais variáveis que possuem vínculo com a “Compostagem”.

Figura 43. Vínculos da “Compostagem” com outras variáveis



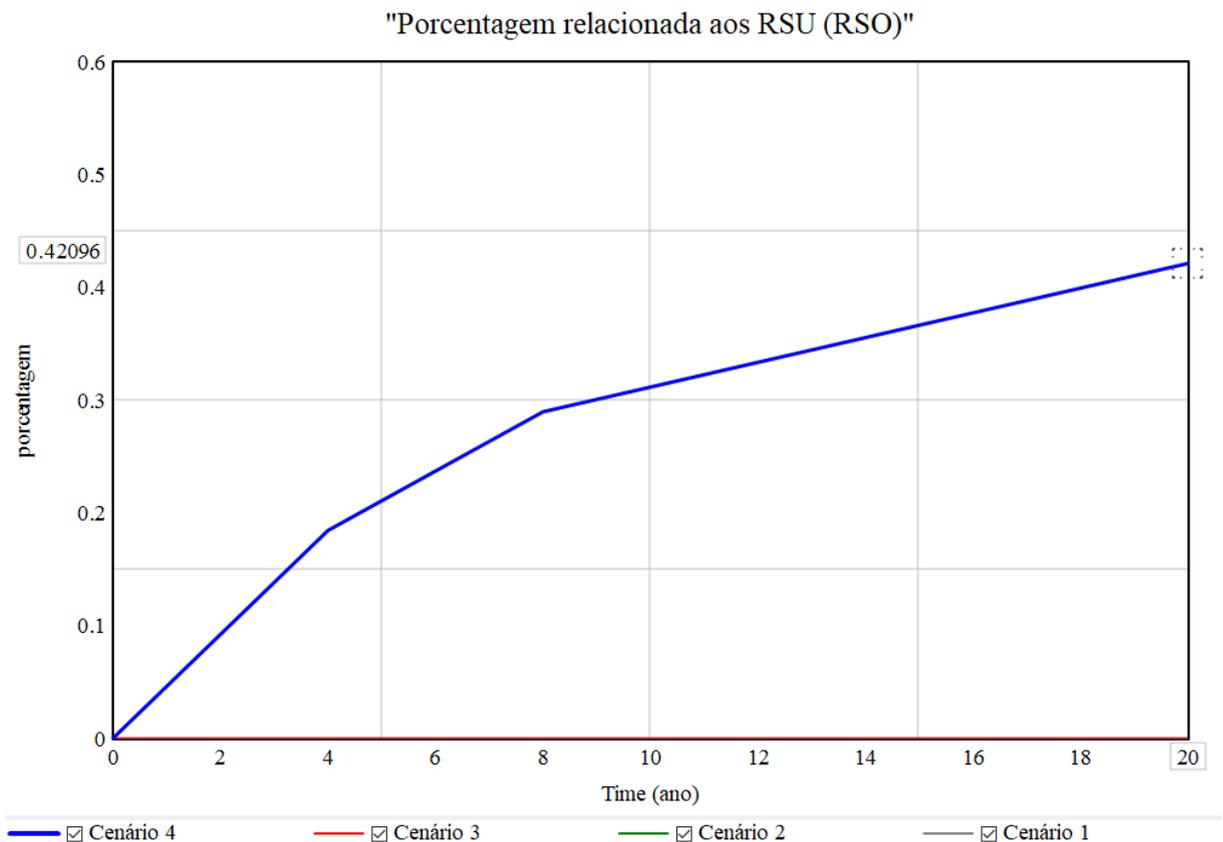
Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)

A “Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)” representa as porcentagens adotadas, conforme o PMGIRS, para o aumento da coleta da fração orgânica dos

RSU. Os valores obtidos demonstram que a mesma está relacionada com o total destes resíduos presentes na coleta, ou seja, a multiplicação dos valores dos cenários pela porcentagem dos materiais presentes na coleta dos RSU.

Figura 44. Gráfico obtido para a simulação da “Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Para os cenários 2 e 4 (linha azul) foi observado um comportamento similar à variável “Porcentagem de aumento da coleta seletiva”, com o crescimento vinculado a porcentagem destes materiais presentes na coleta domiciliar e a porcentagem de aumento prevista para os cenários, da seguinte forma: para os primeiros 4 anos, verificou-se uma coleta de até 18,41% (35% de 52,65%), uma coleta de 28,94% (55% de 52,65%) para 8 anos, e uma coleta de 42,09% para os 20 anos (80% de 52,65%).

A figura 45 a seguir, demonstra os resultados obtidos para o aumento da porcentagem.

Figura 45. Resultados obtidos para a variável “Compostagem”

Time (ano)	"Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)"	"Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)"	Runs	Cenário 4	Cenário 3.vdfx	Cenário 2.vdfx	Cenário 1.vdfx
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0460425	0	0.0460425	0	0	0	0
2	0.092085	0	0.092085	0	0	0	0
3	0.138127	0	0.138127	0	0	0	0
4	0.18417	0	0.18417	0	0	0	0
5	0.21048	0	0.21048	0	0	0	0
6	0.23679	0	0.23679	0	0	0	0
7	0.2631	0	0.2631	0	0	0	0
8	0.28941	0	0.28941	0	0	0	0
9	0.300373	0	0.300373	0	0	0	0
10	0.311335	0	0.311335	0	0	0	0
11	0.322298	0	0.322298	0	0	0	0
12	0.33326	0	0.33326	0	0	0	0
13	0.344222	0	0.344222	0	0	0	0
14	0.355185	0	0.355185	0	0	0	0
15	0.366147	0	0.366147	0	0	0	0
16	0.37711	0	0.37711	0	0	0	0
17	0.388072	0	0.388072	0	0	0	0
18	0.399035	0	0.399035	0	0	0	0
19	0.409997	0	0.409997	0	0	0	0
20	0.42096	0	0.42096	0	0	0	0

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Figura 46. Vínculos diretos com a variável Compostagem.

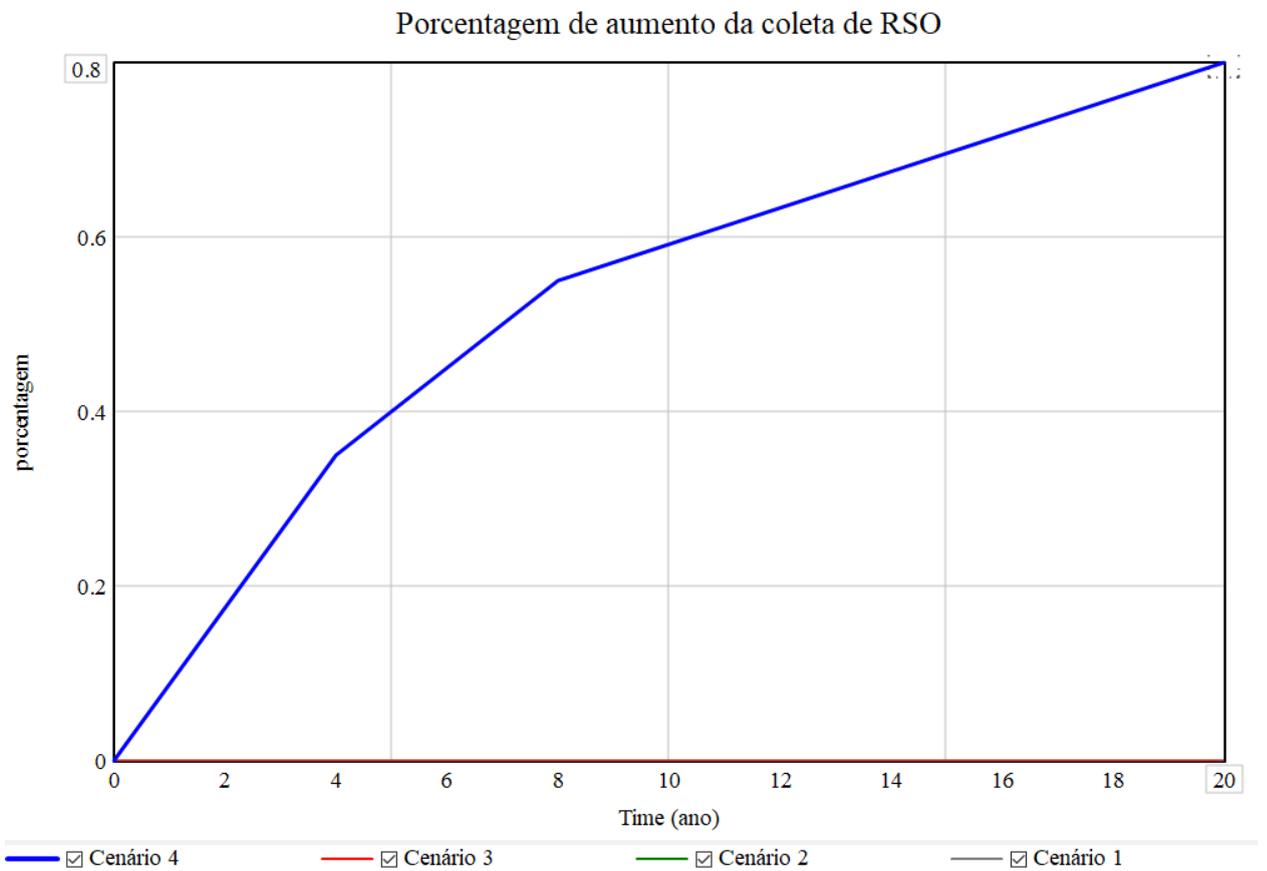
Time — Porcentagem de aumento da coleta de RSO — Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Porcentagem de aumento da coleta de RSO

A “Porcentagem de aumento da coleta de RSO” foi tratada como a evolução progressiva dos cenários de aumento da coleta da FORSU. Verificou-se que o crescimento nos 4 primeiros anos é o mais expressivo e, após, uma tendência decrescente até atingir a marca dos 80%. Os cenários 1 e 3 (linha vermelha) não apresentam nenhum comportamento, pois são nulos, e os cenários 2 e 4 apresentam o crescimento previsto pelo PMGIRS.

Figura 47. Gráfico obtido para a simulação da “Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Os valores obtidos podem ser visualizados na figura 48 a seguir.

Figura 48. Dados obtidos para a simulação da “Porcentagem relacionada aos RSU (RSO)”

Time (ano)	"Porcentagem de aumento da coleta de RSO"	Porcentagem de aumento da coleta de RSO			
0	de aumento	0	0	0	0
1	da coleta de	0.0875	0	0.0875	0
2	RSO" Runs:	0.175	0	0.175	0
3	Cenário 4	0.2625	0	0.2625	0
4	Cenário 3.vdfx	0.35	0	0.35	0
5	Cenário 2.vdfx	0.4	0	0.4	0
6	Cenário 1.vdfx	0.45	0	0.45	0
7		0.5	0	0.5	0
8		0.55	0	0.55	0
9		0.570833	0	0.570833	0
10		0.591667	0	0.591667	0
11		0.6125	0	0.6125	0
12		0.633333	0	0.633333	0
13		0.654167	0	0.654167	0
14		0.675	0	0.675	0
15		0.695833	0	0.695833	0
16		0.716667	0	0.716667	0
17		0.7375	0	0.7375	0
18		0.758333	0	0.758333	0
19		0.779167	0	0.779167	0
20		0.8	0	0.8	0

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Conforme figura 48, os valores para os cenários 1 e 3 são nulos e há apenas o crescimento previsto para os cenários 2 e 4, os quais adotam as porcentagens de aumento da coleta prevista pelo Plano. Os resultados foram obtidos com a utilização da função lookup e seu vínculo com o tempo ocorre por meio do tempo inicial da equação, o tempo previsto pelo modelo e a respectiva variável, conforme figura 49 a seguir.

Figura 49. Variáveis vinculadas à “Porcentagem de aumento da coleta de RSO”

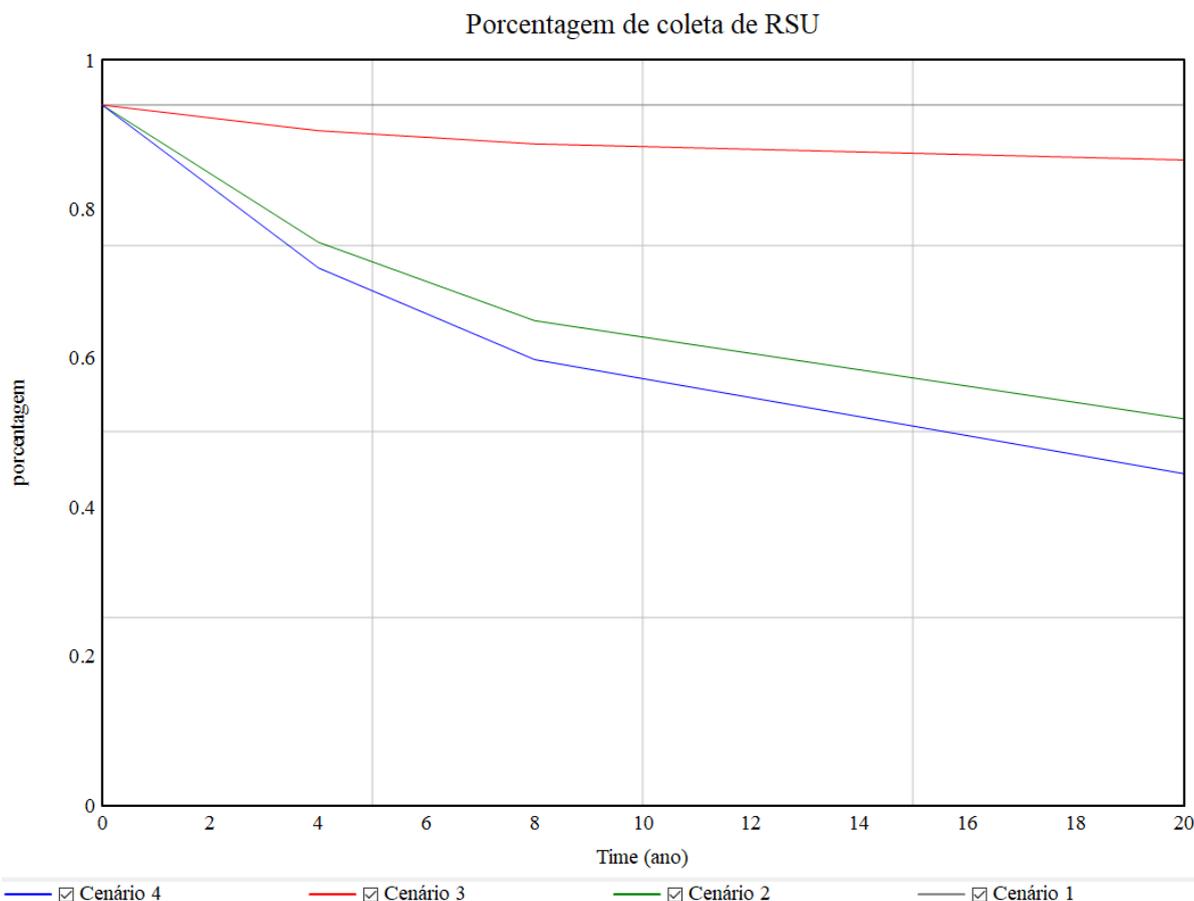
INITIAL TIME — Time — Porcentagem de aumento da coleta de RSO

Fonte: extraída da ferramenta Vensim

Porcentagem de coleta de RSU

A “Porcentagem de coleta de RSU” é a variável mais representativa presente no modelo. Ela irá demonstrar a quantidade de resíduos que serão encaminhados para o aterro sanitário e possui vínculo direto com a “Porcentagem de coleta de RSU (RSO)” e a “Porcentagem de aumento da coleta seletiva”. O gráfico obtido pela simulação dos diferentes cenários pode ser visualizado na figura 50 a seguir.

Figura 50. Gráfico obtido para a simulação da “Porcentagem de coleta de RSU”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Para o cenário 1 (linha cinza), como não há alterações previstas para o modelo, a linha se mantém constante no valor de 0,9392 (93,92%), correspondente a quantidade de resíduos coletados pela coleta seletiva e encaminhados para a Cooperativa Reviver (6,08%). No cenário 2 (linha verde), é mantida a porcentagem adotada para o cenário 1 dos resíduos recicláveis, com o aumento previsto para a coleta da FORSU, a qual é constatada a alta influência destes resíduos dentro do

modelo proposto. Para o cenário 3 (linha vermelha), observa-se o aumento da porcentagem da coleta dos recicláveis e sua representatividade dentro do sistema, a qual não é tão influente quanto à coleta dos FORSU. Por fim, para o cenário 4, verificou-se a influência da adoção de todos os cenários previstos pelo PMGIRS e quão impactante a mesma será dentro do sistema de coleta, podendo reduzir em até 55,55% a quantidade de materiais encaminhados para o aterro sanitário municipal.

Os resultados obtidos para os diferentes cenários podem ser visualizados na figura 51.

Figura 51. valores obtidos para a simulação dos diferentes cenários para a “Porcentagem de coleta de RSU”

Time (ano)	"Porcentagem de coleta de RSU" Runs:	Porcentagem de coleta de RSU			
0		0.9392	0.9392	0.9392	0.9392
1		0.884533	0.930575	0.893157	0.9392
2	Cenário 4	0.829865	0.92195	0.847115	0.9392
3	Cenário 3.vdfx	0.775198	0.913325	0.801072	0.9392
4	Cenário 2.vdfx	0.72053	0.9047	0.75503	0.9392
5	Cenário 1.vdfx	0.689795	0.900275	0.72872	0.9392
6		0.65906	0.89585	0.70241	0.9392
7		0.628325	0.891425	0.6761	0.9392
8		0.59759	0.887	0.64979	0.9392
9		0.584836	0.885208	0.638828	0.9392
10		0.572082	0.883417	0.627865	0.9392
11		0.559327	0.881625	0.616902	0.9392
12		0.546573	0.879833	0.60594	0.9392
13		0.533819	0.878042	0.594977	0.9392
14		0.521065	0.87625	0.584015	0.9392
15		0.508311	0.874458	0.573053	0.9392
16		0.495557	0.872667	0.56209	0.9392
17		0.482803	0.870875	0.551127	0.9392
18		0.470048	0.869083	0.540165	0.9392
19		0.457294	0.867292	0.529203	0.9392
20		0.44454	0.8655	0.51824	0.9392

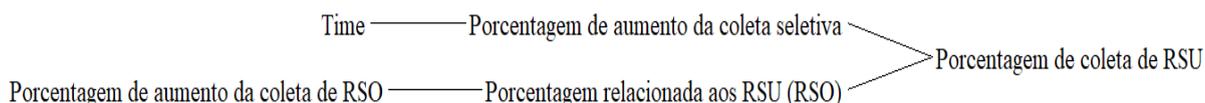
Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

De acordo com os dados obtidos, verificou-se uma diferença no aumento da coleta dos recicláveis (cenário 1 e cenário 3) de 0,0737 (7,37%), apenas, e uma diferença considerável de 0,4210 (42,10%) para a destinação da FORSU (cenário 2). O cenário 4, final, apresenta-se como melhor alternativa para toda a modelagem,

caso sejam supridas todas as deficiências do sistema, como a limitação da triagem de resíduos pela Cooperativa.

A figura 52 a seguir demonstra as principais variáveis que possuem vínculo com a “Porcentagem de coleta de RSU”.

Figura 52. Principais variáveis vinculados a “Porcentagem de coleta de RSU”

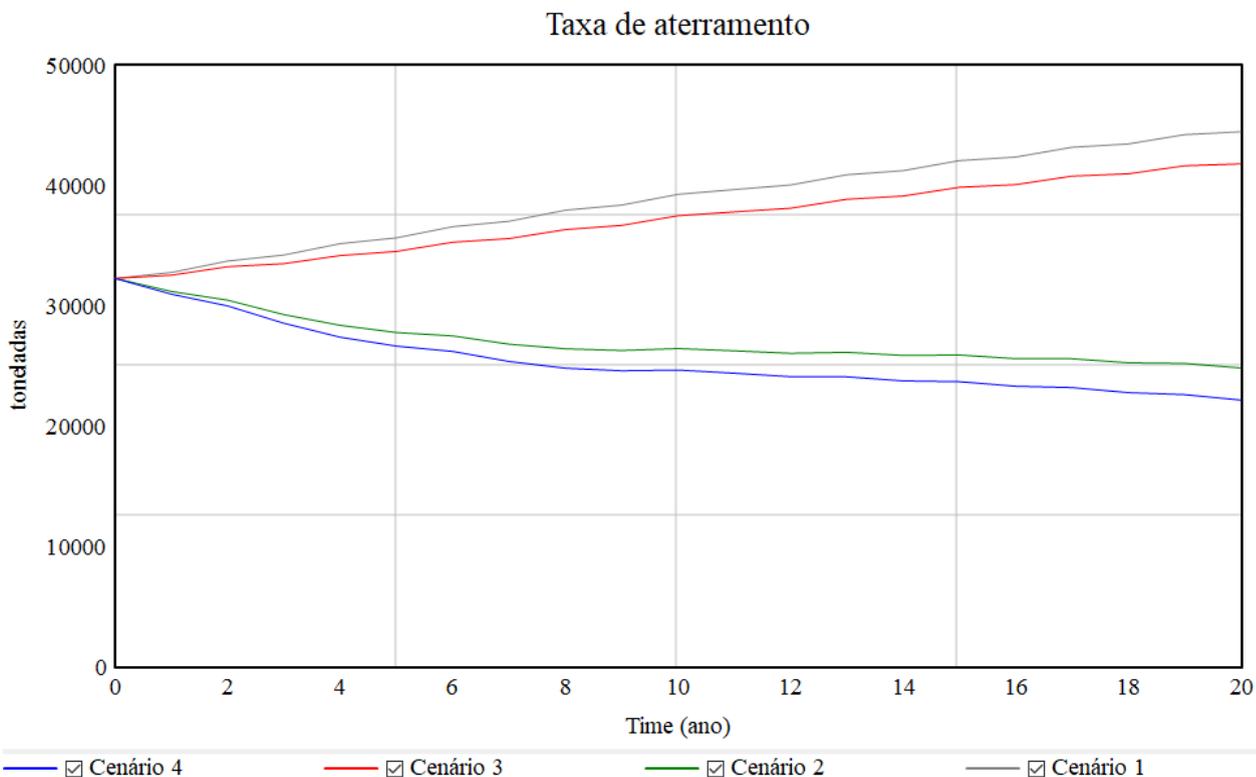


Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Taxa de aterramento

A variável taxa de aterramento demonstra a evolução da quantidade de resíduos que serão encaminhados ao aterro por ano. Ela foi modelada para os 4 diferentes cenários e o resultado pode ser verificado na figura 53.

Figura 53. Gráfico obtido para a variável “Taxa de aterramento”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Os resultados demonstram uma tendência de crescimento da quantidade de resíduos encaminhados ao aterro para os cenários 1 (linha cinza) e 3 (linha vermelha). Quando aplicado o destino adequado para os FORSU, verificou-se um comportamento decrescente no gráfico, o qual reforça a importância da destinação destes materiais. A figura 54 a seguir demonstra os valores obtidos para a modelagem.

Figura 54. Valores obtidos para a simulação dos diferentes cenários para a “Taxa de aterramento”

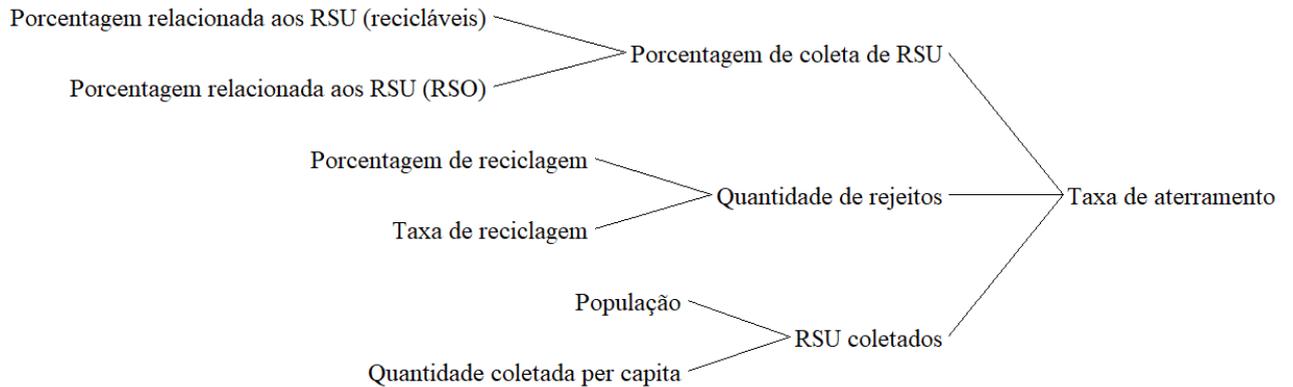
Time (ano)	"Taxa de aterramento"	Taxa de aterramento			
0		32239.7	32239.7	32239.7	32239.7
1	Runs:	30928.3	32510.5	31158.5	32740.7
2	Cenário 4	29957.5	33213.3	30431.2	33687
3	Cenário 3.vdfx	28512.4	33469.1	29233.6	34190.2
4	Cenário 2.vdfx	27352.2	34142.9	28340.2	35130.9
5	Cenário 1.vdfx	26616.1	34483.6	27746.2	35613.6
6		26170.1	35252.1	27461.5	36543.5
7		25337.4	35552.8	26778.1	36993.5
8		24783.3	36299.4	26396.5	37912.6
9		24565	36651.8	26252.4	38339.1
10		24628.2	37447.8	26412.2	39231.8
11		24364.1	37769.7	26224	39629.6
12		24079	38073.5	26015.2	40009.7
13		24059.8	38821.1	26096.7	40858
14		23726.9	39085.8	25841.1	41200
15		23659.9	39811.7	25878	42029.8
16		23280.7	40035.4	25576.6	42331.3
17		23167.1	40739.1	25569.9	43141.9
18		22751.5	40934.8	25233	43416.3
19		22584.7	41601.1	25175.1	44191.5
20		22130.8	41761.3	24800.1	44430.5

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Os dados obtidos demonstram que a variação para os cenários que adotaram a coleta seletiva, no período de 20 anos, é de uma diferença de 2.670 toneladas a menos para os que não a aplicaram. Verificou-se, também, que a aplicação da coleta dos FORSU permitirá o não aterramento de 19.630 toneladas de resíduos a mais por ano, quando comparado aos cenários que não a adotaram. As principais

variáveis vinculadas à “Taxa de aterramento” podem ser visualizadas na figura 55 a seguir.

Figura 55. Principais vínculos à variável “Taxa de aterramento”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

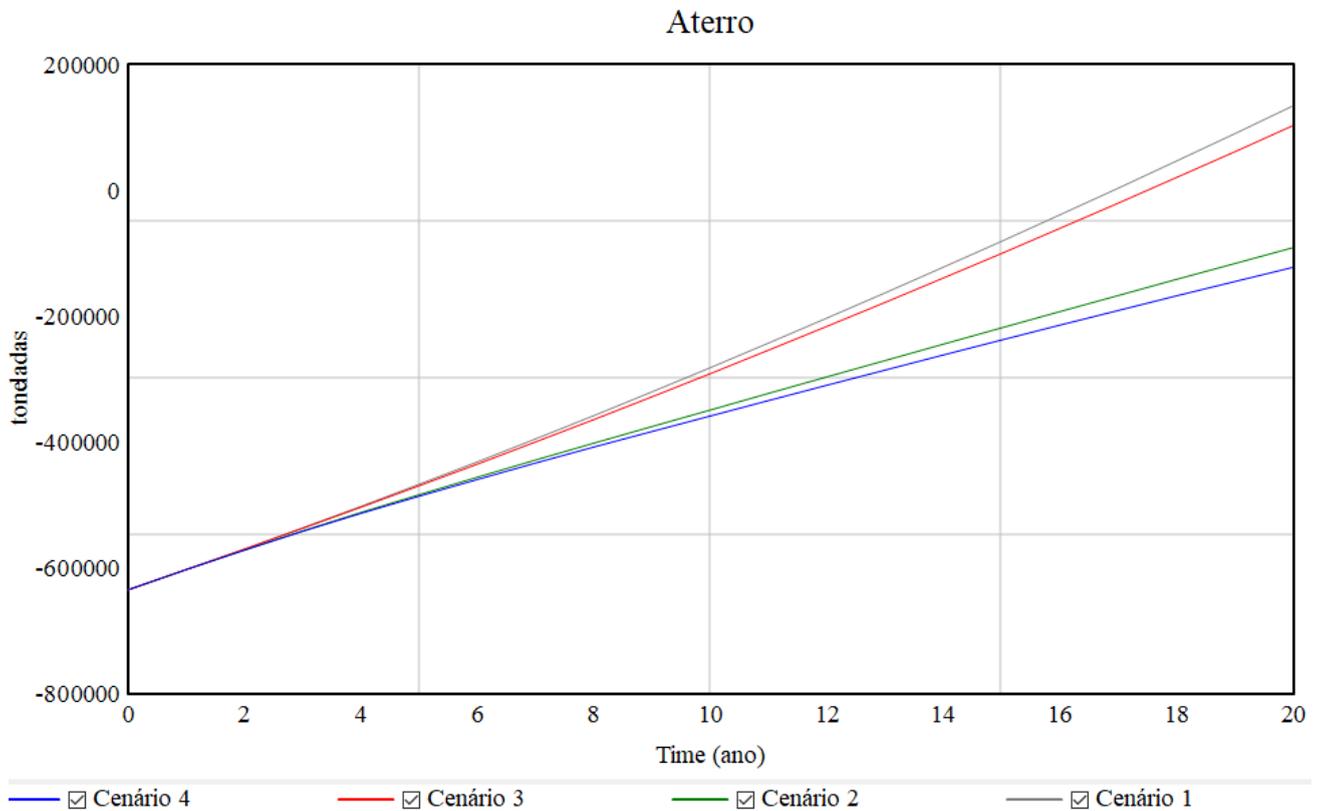
A figura 55 comprova o grande vínculo da respectiva variável a todo o modelo, demonstrando o quão dependente e sensível é a modelagem pela dinâmica de sistemas.

Aterro

A variável aterro representa qual é a vida útil prevista para o aterro sanitário para a simulação dos diferentes cenários ou a quantidade de resíduos que serão aterrados ao longo do tempo. A aplicação de simulações para a redução do encaminhamento da fração orgânica dos RSU para o aterro demonstra uma tendência de redução expressiva na quantidade prevista de resíduos encaminhados.

Para os cenários 1 e 3, é previsto o encerramento da vida útil do aterro entre 16 e 17 anos, o que configura a inexpressividade da aplicação dos cenários de aumento na quantidade de resíduos recicláveis coletados isolados. A figura 56 a seguir, demonstra a resposta do modelo matemático simulado para os diferentes cenários e confere uma alta representatividade para o tratamento da fração orgânica dos RSU, com uma diferença não muito significativa para os cenários que adotaram a coleta seletiva.

Figura 56. Gráfico obtido para a variável “Aterro”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Os dados obtidos para a respectiva variável corroboram com a resposta de todas as outras aplicadas no modelo, tanto no aspecto do crescimento negativo para os cenários que adotaram a coleta do FORSU, quanto para a diferença não tão significativa para a melhoria do sistema de coleta dos recicláveis. Tal expressividade é justificada pela não adoção de práticas para a destinação dos RSO pela Prefeitura do Município de Itatiba, além de que os mesmos, dentro das análises gravimétricas obtidas para a coleta dos RSU, representam uma maior porcentagem. Os valores obtidos podem ser visualizados na figura 57 a seguir.

Figura 57. Valores obtidos para a simulação dos diferentes cenários para a “Taxa de aterramento”

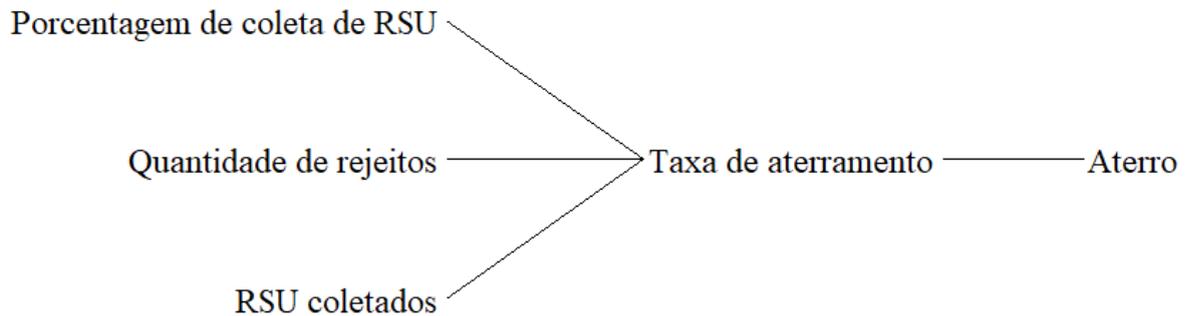
Time (ano)	"Aterro" Runs: Aterro				
0	Cenário 4	-636233	-636233	-636233	-636233
1	Cenário 3.vdfx	-603993	-603993	-603993	-603993
2	Cenário 2.vdfx	-573065	-571483	-572835	-571253
3	Cenário 1.vdfx	-543108	-538270	-542404	-537566
4		-514595	-504800	-513170	-503375
5		-487243	-470658	-484830	-468245
6		-460627	-436174	-457084	-432631
7		-434457	-400922	-429622	-396087
8		-409119	-365369	-402844	-359094
9		-384336	-329070	-376448	-321181
10		-359771	-292418	-350195	-282842
11		-335143	-254970	-323783	-243610
12		-310779	-217200	-297559	-203981
13		-286700	-179127	-271544	-163971
14		-262640	-140306	-245447	-123113
15		-238913	-101220	-219606	-81913.2
16		-215253	-61408.4	-193728	-39883.4
17		-191972	-21372.9	-168152	2447.88
18		-168805	19366.1	-142582	45589.8
19		-146054	60300.9	-117349	89006
20		-123469	101902	-92173.4	133198

Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Os valores foram obtidos com base na consideração das estimativa da vida útil prevista para o aterro sanitário municipal (636.233 toneladas) e demonstram que a mesma será esvaída em 16-17 anos, caso não seja adotado nenhum dos cenários previstos pelo Plano. Se for considerada a destinação apenas dos recicláveis, a vida útil será de 18 anos. Para ambos os cenários que consideraram a destinação dos FORSU, a expectativa é que a mesma será suficiente e irá perdurar por mais alguns anos. Se o cenário 4 for adotado, a previsão de utilização da vida útil será de apenas 80,60% do estimado, com tendência a aumentar consideravelmente a projeção.

As principais variáveis que alteram o “Aterro” podem ser visualizadas na figura 58 a seguir.

Figura 58. Principais vínculos à variável “Aterro”



Fonte: obtida com o auxílio da ferramenta Vensim

Conforme a figura supracitada, as principais variáveis que afetarão diretamente a quantidade de RSU encaminhados ao aterro sanitário municipal são a Porcentagem de coleta de RSU, a Quantidade de rejeitos e os RSU coletados, além da respectiva Taxa de aterramento que está vinculada por meio da variável do tipo estoque.

6. Conclusão

6.1. Do modelo matemático

De acordo com os resultados obtidos e por meio da validação do modelo, verificou-se que o modelo proposto condiz com a realidade do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos do Município de Itatiba. O mesmo, por meio da alteração simples de algumas variáveis, permite ao usuário manusear a estimativa da geração dos resíduos e adequar para as necessidades do Poder Público, de forma a auxiliar no processo de tomada de decisão.

O modelo foi formatado para atender a realidade do município de Itatiba para a situação da avaliação de diferentes cenários para a melhoria do sistema de coleta de resíduos recicláveis e da fração orgânica dos RSU. De acordo com os resultados obtidos, ele pode ser utilizado para municípios de médio porte e adaptado para análise de diferentes cenários, além dos propostos neste trabalho.

A adaptação do modelo é precedida pela alteração das variáveis vinculadas a geração per capita, projeção populacional, porcentagem de aumento da coleta seletiva, porcentagem de aumento da coleta da FORSU, porcentagem de reciclagem e a quantidade de rejeitos.

6.2. Dos resultados obtidos

Para os sistemas de coleta do Município, conclui-se que será de grande importância a adoção de sistemas que possibilitem a coleta e a destinação da fração orgânica dos RSU para sistemas de reaproveitamento, reciclagem ou redução de geração, como a compostagem. Complementarmente, para a coleta seletiva, constatou-se que o atual sistema de coleta e tratamento dos resíduos sólidos recicláveis não será suficiente para a aplicação dos cenários 3 e 4 previstos, sendo necessária a adoção de novas ferramentas de gestão, como a melhoria do recebimento e triagem da Cooperativa Reviver, a adoção de uma nova cooperativa

ou um programa de apoio aos catadores de materiais recicláveis que já fazem parte do sistema.

Sobre a vida útil prevista para o aterro sanitário municipal, verificou-se que o sistema irá se esvair em aproximadamente 16 anos se não forem adotadas as práticas previstas pelo PMGIRS. A quantidade de resíduos aterrada é drasticamente inferior (uma diferença de 256.667,04 toneladas, o equivalente a 66,64% a mais de resíduos aterrados) caso o estabelecido pelo Plano seja seguido na íntegra, quando comparado ao cenário base.

Também foi verificada uma representatividade muito maior para a coleta da fração orgânica dos RSU em comparação a dos recicláveis, com uma diferença do total de resíduos aterrados de 31.296 toneladas para os recicláveis e 225.371,4 para a FORSU, quando comparados ao cenário base (cenário 1).

Dos cenários propostos, sugere-se que os processos de tomada de decisão do poder Público Municipal de Itatiba sejam focados na aplicação do cenário 2, com a evolução prevista para a coleta do FORSU, e na otimização do sistema de coleta seletiva, de forma a expandir a capacidade de triagem e comercialização dos resíduos coletados no Município e garantir o aumento da vida útil do aterro sanitário, em concomitância a aplicação de tecnologias que permitam a reciclagem e o reaproveitamento dos RSO.

7. Referências Bibliográficas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020. 52 p.

ANRESNANI, D. S.; WIDODO, E.; SYAIRUDDIN, Bambang. Modelling Integration of System Dynamics and Game Theory for of Financial Technology Peer to Peer Lending Industry. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018. p. 07006.

BONIFÁCIO, G.; GUIMARÃES, R. **Projeções populacionais por idade e sexo para o Brasil até 2100**. 2021.

BRASIL, PNRs. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, v. 3, 2010.

CAI, L.; LIU, Y. Application of system dynamics for municipal waste management in China: a case study of Beijing. In: **Conference Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society**. 2013. p. 21-25.

DEATON, M.; WINEBRAKE, J. J. Dynamic modeling of environmental systems. **Springer Science & Business Media**, 1999.

GIANNIS, Apostolos *et al.* Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 19, n. 3, p. 1177-1185, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-016-0503-2>

Giordano, F. R.; Fox, W., P.; Horton, S. B. (2013). **A first course in mathematical modeling**. Cengage Learning. Disponível em: <https://cengagebrasil.vitalsource.com/#/books/9781285531762/>. Acesso em: 14 jun. 2020.

GUERRERO, Lilliana Abarca; MAAS, Ger; HOGGLAND, William. Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste management**, v. 33, n. 1, p. 220-232, 2013.

Guo, H.; Hobbs, B.; Lasater, M.; Parker, C.; Winch, P. (2016). System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal

behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study. **Waste Management (Elmsford)**, 56, 547-560. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.019>.

HEBER, F.; SILVA, Elvis M. D. Institucionalização da Política Nacional de Resíduos Sólidos: dilemas e constrangimentos na Região Metropolitana de Aracaju (SE). **Rev. Adm. Pública**, Rio de Janeiro, v. 48, n. 4, p. 913-937, jul./ago. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama das cidades**. Rio de Janeiro: 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/itatiba/panorama>. Acesso em: 09 maio 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Perfil dos municípios brasileiros: pesquisa de informações básicas municipais**. Rio de Janeiro: 1999. 121 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv84006.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades: Itatiba**. Rio de Janeiro: 2017. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/itatiba/panorama> Acesso em maio de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Rio de Janeiro: 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 05 out. 2021.

ITATIBA. PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE ITATIBA. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Itatiba, 2019. 148 p. Disponível em: http://www.itatiba.sp.gov.br/templates/midia/secretarias/meio_ambiente/pmgirs/plano_municipal_de_gestao_integrada_de_residuos_solidos_de_itatiba.pdf. Acesso em: 03 jan. 2021.

KAZA, Silpa *et al.* **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. World Bank Publications, 2018.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. 2nd ed. McGraw-Hill, 1991.

Madeira, J. L. e Simões, C. C. S. (1972) Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as unidades da Federação, 1960/1980: por uma nova metodologia. **Revista Brasileira de Estatística**, 33 (129), 3-11

Martins, A.; De Lorenzo, H.; Alves de Castro, M. (2017). Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos no município de Araraquara-SP: Formulação e implementação. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, 20(1), 81-92.

NAGLE, R. K.; SAFF, E. B.; SNIDER, A. D. 2012. **Equações Diferenciais**. São Paulo, 8ª edição, Pearson Education do Brasil.

OGATA, K. **System Dynamics**. 4. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2003. 784 f.

OLIVEIRA, T. B. D.; JÚNIOR, A. D. C. (2016). Planejamento municipal na gestão dos resíduos sólidos urbanos e na organização da coleta seletiva. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 21, 55-64.

PINHA, A. C. H.; SAGAWA, J. K. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 269, p. 122350, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122350>.

DE SOUZA NORBERTO, Alison *et al.* Estudo da relação entre a geração de resíduos sólidos urbanos e o Produto Interno Bruto (PIB) per-capito no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e3910111429-e3910111429, 2021.

STERMAN, J. D.. System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. In: ESD INTERNAL SYMPOSIUM, 2003, Mit Sloan School Of Management. Working Paper Series. Cambridge, MA.: Massachusetts Institute Of Technology. **Engineering Systems Division**, 2003. p. 01 - 30.

TANG, V.; VIJAY, S. **System dynamics. Origins, Development, and Future Prospects of a Method**, 2011. p.1-12.

USMANI, Zeba *et al.* Municipal solid waste to clean energy system: A contribution toward sustainable development. In: **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**. Elsevier, 2020. p. 217-231.

VENTANA SYSTEMS. **Vensim Simulation Software 2020**. Disponível em: <<http://www.vensim.com>>. Acesso em: mai. 2020.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects 2019**. 2019.

YEARWORTH, M. **A brief introduction to system dynamics modeling.** University of Bristol, 2014.

ZHAO, W.; REN, H.; ROTTER, V. S. A system dynamics model for evaluation the alternative of type in construction and demolition waste recycling center – The case of Chongqing, China. **Resources, Conservation and Recycling**, v.55.

Apêndice A - Equações utilizadas para a variável LOOKUP na ferramenta VENSIM

Quantidade coletada per capita

Quantidade coletada per capita (t) = WITH LOOKUP (Time, [(0,0)-(20,20)],(0,0.76),(1,0.76),(2,0.77),(3,0.77),(4,0.78),(5,0.78),(6,0.79),(7,0.79),(8,0.8),(9,0.8),(10,0.81),(11,0.81),(12,0.81),(13,0.82),(14,0.82),(15,0.83),(16,0.83),(17,0.84),(18,0.84),(19,0.85),(20,0.85))

Porcentagem de aumento da coleta seletiva

Porcentagem de aumento da coleta seletiva (t) = WITH LOOKUP (Time, [(0,0)-(10,10)],(0,0.0608),(4,0.0953),(8,0.113),(20,0.1345))

Porcentagem de compostagem

Porcentagem de compostagem (t) = WITH LOOKUP (Time, [(4,0)-(20,1)],(4,0.35),(8,0.55),(20,0.8))