

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

GESTÃO E HIERARQUIZAÇÃO DE ROTAS TECNOLOGICAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. UM ESTUDO DE CASO DO BRASIL

Maria Odete Holanda Mariano ¹
* Alison de Souza Norberto ¹
Fernando Henrique Ferreira de Alves Melo ¹

MANAGEMENT AND HIERARCHIZATION OF TECHNOLOGICAL ROUTES OF URBAN SOLID WASTE - A CASE STUDY IN BRAZIL

Recibido el 28 de febrero de 2019; Aceptado el 18 de febrero de 2020

Abstract

En Brasil, la eliminación se lleva a cabo principalmente a través de prácticas inadecuadas, lo que conduce a daños ambientales, dado el poder de contaminación de los residuos sólidos que eventualmente difunden la contaminación del suelo, los recursos hídricos, la proliferación de aire y vectores, generando así varios problemas de salud pública. Ante este escenario, las autoridades brasileñas preocupadas por estos riesgos, promulgaron la Ley N ° 12.305 / 2010 que discute la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), cuyo objetivo es prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, proponiendo hábitos. Herramientas e instrumentos sostenibles para aumentar el reciclaje y la reutilización de los residuos sólidos y la eliminación adecuada de los residuos. Con base en el PNRS y centrándose en el escenario de los municipios de Agreste Pernambucano, y de esta forma se estudiaron los estándares ambientales para la disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU), el modelo de gestión de RSU y el uso de una herramienta de apoyo. a la decisión aplicada a los municipios de: Agrestina, Altinho, Bonito, Belém de Maria y Lagoa dos Gatos, que forman parte de COMAGSUL - Consorcio de los Municipios de Agreste y Mata Sul. Para este propósito, se utilizó la herramienta IST Versión 1.0 2013. permitir la jerarquía de rutas tecnológicas de tratamiento y destino final de los residuos, además del análisis comparativo con la gestión adoptada en Brasil y para el estado de Pernambuco. El uso de la herramienta resultó en la indicación de tres rutas tecnológicas con alto índice de sostenibilidad ambiental por parte de la herramienta IST.

Keywords: solid waste, management, PNRS, applied decision tool, technological routes.

¹ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil.

* *Autor correspondente:* Universidade Federal de Pernambuco, Campus Acadêmico do Agrste. Rodovia BR 104 KM 59 s/n, Sítio Juriti, Nova Caruaru, 55002970 - Caruaru, PE – Brasil. Brasil. Email: alison_norberto@hotmail.com

Resumo

No Brasil, a disposição em sua maioria é realizada através de práticas inadequadas, o que leva a prejuízo ambiental, visto o poder de contaminação dos resíduos sólidos que acabam por disseminar a contaminação do solo, de recursos hídricos, do ar e proliferação de vetores, gerando, portanto, diversos problemas de saúde pública. Diante deste cenário, as autoridades brasileiras preocupadas com estes riscos, promulgaram a Lei nº 12.305/2010 que discorre sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), e que tem como intuito a prevenção e a redução da geração dos resíduos sólidos, propondo hábitos sustentáveis e instrumentos para elevar a reciclagem e reaproveitamento dos resíduos sólidos e destinação adequada dos rejeitos. Baseado na PNRS e com enfoque para o cenário dos municípios do Agreste Pernambucano, e assim, atender as normas ambientais de disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), estudou-se o modelo de gerenciamento de RSU e a utilização de uma ferramenta de apoio à decisão aplicada para os municípios de: Agrestina, Altinho, Bonito, Belém de Maria e Lagoa dos Gatos, que fazem parte do COMAGSUL - Consórcio dos Municípios do Agreste e Mata Sul. Nesse intuito, utilizou-se a ferramenta IST Versão 1.0 de 2013 para possibilitar a hierarquização de rotas tecnológicas de tratamento e destino final dos resíduos, além da análise comparativa com a gestão adotada no Brasil e para o estado de Pernambuco. A utilização da ferramenta produziu como resultado final a indicação de três rotas tecnológicas com elevado índice de sustentabilidade ambiental pela ferramenta IST.

Palavras chave: resíduos sólidos, gerenciamento, PNRS, ferramenta de decisão aplicada, rotas tecnológicas.

Introdução

A geração de resíduos sólidos está diretamente correlacionada ao modo de vida, crescimento populacional e padrões de consumo. Sua capacidade de transformação em larga escala, devido ao alto poder de contaminação, faz desse material um dos potenciais problemas da sociedade moderna (Philippi Jr., 2004).

Segundo Neto (2013) fatores como: o aumento da expectativa de vida da população, a intensa urbanização e o surgimento de novas tecnologias, viabilizam a produção exponencial de bens de consumo, sobretudo os não duráveis e propiciam o aporte na produção de imensas quantidades de resíduos, desafiando o poder público em sua capacidade de resolução do problema.

Considerando o alto impacto causado pelos resíduos, torna-se imprescindível a discussão ampla na sociedade sobre seu tratamento e destinação final, abordando os aspectos tecnológicos, econômicos, sociais, políticos e ambientais, levando em consideração as diversas alternativas tecnológicas existentes e considerando, sobretudo, as regionalidades de cada local, a valorização econômica dos materiais e sua valorização energética quando viável (Gusmão *et al.*, 2016).

No Brasil, 70% dos municípios possuem contingentes populacionais inferiores a 20.000 habitantes. Nesses locais a ausência de legislações atualizadas e marcos de referência institucionais e políticos, bem como instrumentos de financiamento, compõe o retrato do gerenciamento dos resíduos. Destaca-se a inclusão informal de parcela considerável da população, marginalizada do processo econômico e produtivo, realizando o processo de catação

dos resíduos sólidos, não sendo rara a presença de crianças e adultos em lixões, sem qualquer respaldo do poder público constituído (Jardim, 2012).

Os problemas dos municípios de pequeno porte são estruturais. Arrecadação insuficiente, restrições orçamentárias capazes de viabilizar a coleta, tratamento e a disposição final, e a estrutura administrativa reduzida, por vezes incapazes tecnicamente, compõem uma situação comum e grave na promoção do gerenciamento apropriado dos resíduos (Fialho, 2011).

Para Tchobanoglous (2002) o mecanismo utilizado mundialmente para mitigar os impactos causados pelos resíduos é o gerenciamento integrado. Essa estrutura operacional de gestão adota diversas técnicas para o manejo dos distintos elementos no fluxo de materiais. Os elementos fundamentais são avaliados e utilizados, e todas as suas interfaces e conexões são consideradas para se conseguir a solução mais eficaz e econômica.

Os representantes municipais ao se depararem com a quantidade de resíduos gerada em seu território e frente à necessidade de soluções práticas e imediatas, acabam adotando medidas desprovidas de análises técnicas, considerando principalmente a questão financeira para implementar novos mecanismos para o gerenciamento dos resíduos (Mersoni; Reichert, 2015). Contudo, ainda existem pontos a serem esclarecidos sobre o melhor modo de gerenciamento municipal. Sistemas hierarquizados e predefinidos, como regra adequada para todas as situações, baseados na redução na origem; reaproveitamento e reciclagem; tratamento e disposição final, por exemplo, não são necessariamente suficientes ou adequados por si só, já que existe a possibilidade de não contemplarem todo o fluxo em uma determinada cidade ou região (Melo, 2015).

Segundo Lima *et al.* (2013) a problemática da tomada de decisão é caracterizada por um número crescente de alternativas e critérios, posto que os decisores necessitam selecionar, ordenar, classificar ou ainda descrever com detalhes as alternativas tecnológicas disponíveis, considerando múltiplos critérios.

A utilização somente da hierarquização nesses moldes, não permite o estabelecimento de um sistema otimizado capaz de ser replicado, pois não está claro ainda, como um sistema municipal de gerenciamento de resíduos sólidos pode ser desenvolvido de modo que seja integrado e sustentável. Nesse contexto, observam-se as ferramentas adequadas e eficazes para tomada de decisão, na adoção de soluções de gerenciamento junto aos gestores públicos, uma vez que o despreparo técnico e gerencial dos administradores e a falta de metodologia que possibilite o auxílio à tomada de decisão são regras (Reichert, 2013).

Este trabalho apresenta os resultados da tese de Melo (2015), a qual utilizou como estudo de caso cinco municípios brasileiros que depositavam resíduos em lixões, e passaram a destinar seus

resíduos a um aterro sanitário localizado na cidade de Altinho. Através da utilização de uma ferramenta de apoio à decisão foi possível a obtenção de cenários com tecnologias de tratamento e disposição final de RSU que atendam a realidade daquelas localidades, com base nas informações de estruturas adquiridas, além da composição gravimétrica dos resíduos.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A geração de resíduos sólidos está diretamente correlacionada ao modo de vida da região geradora dos resíduos. A região estudada é composta de cinco municípios de pequeno porte, quatro deles localizados na Região de Desenvolvimento (RD) do Agreste Central (Agrestina, Altinho, Lagoa dos Gatos e Bonito) e um na RD Mata Sul (Belém de Maria), todos situados no estado de Pernambuco (Figura 1). Os municípios apresentam baixo grau de desenvolvimento econômico, com média populacional de aproximadamente 22,600.6 habitantes, segundo estimativas do IBGE para o ano de 2014. O município de Belém de Maria apresenta-se como o menos populoso, com uma população de 11,777 habitantes; já o mais populoso é o município de Bonito com 38,278 habitantes.

Estes municípios fazem parte do COMAGSUL- Consórcio dos Municípios do Agreste e Mata Sul, regidos pela resolução nº14/2013 Estatuto Social, publicado no diário oficial do estado de Pernambuco nº29, pág. 29 de 12 de fevereiro de 2014. E depositam seus RSU no aterro sanitário localizado no município de Altinho.

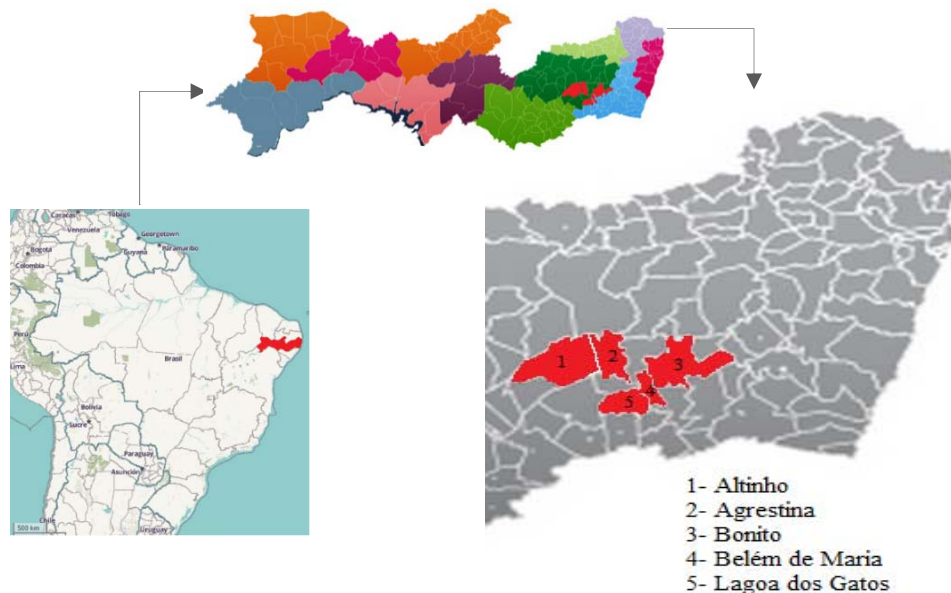


Figura 1. Localização dos municípios consorciados que depositam resíduos no aterro do COMAGSUL. Fonte: BDE (2015).

Os municípios de Altinho, Agrestina, Bonito, Belém de Maria e Lagoa dos Gatos apresentam a economia fundamentada nos serviços, seguido pela indústria e agropecuária. Vale destacar o potencial de confecções familiares de pequeno porte, sobretudo nos municípios de Altinho, Agrestina, Belém de Maria e Lagoa dos Gatos, que se apresentam como suporte a grandes centros de confecção da região, como Caruaru. A disposição final de resíduos sólidos dos municípios é realizada no local onde atualmente encontra-se o aterro sanitário de Altinho/Agrestina, o “Sítio Juá” 8°28’27.69” S; 36°00’26.67” O no município de Altinho.

Inicialmente o local possuía características de um lixão, onde os resíduos eram dispostos a céu aberto, com a presença de catadores vivendo e trabalhando no local. A partir dessa situação a comarca de Altinho, por meio da promotoria de justiça moveu uma ação judicial, visando a extinção do lixão e regularização da área como aterro sanitário. A ação previa, dentre outras coisas: a instalação de um aterro sanitário, a retirada da população que residia no local, a recuperação da área, dentre outras medidas exigidas pela Lei nº 12.305/2010.

Análise dos indicadores sociais, econômicos e ambientais dos municípios

O município de Altinho apresenta clima tropical e bioma caatinga. A economia local está dividida setorialmente da seguinte forma: 4.77% do valor adicionado bruto vem da Agropecuária; 14.04% da Indústria; 81.18% de serviços, desse montante 52.15% advém da administração pública. A geração de resíduos sólidos per capita foi de 0.61 kg/hab/dia, com geração total de 8.320 ton (SEMAS, 2012; IBGE, 2010; BDE, 2015).

Os municípios de Altinho, Agrestina, Belém de Maria, Bonito e Lagoa dos Gatos, apresentam dados característicos de municípios com baixo desenvolvimento socioeconômico, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Indicadores sociais, econômicos e ambientais dos municípios que depositam resíduos sólidos no aterro do COMAGSUL.

Indicadores	Agrestina	Altinho	Bonito	Lagoa dos Gatos	Belém de Maria
Área da unidade territorial (km ²)	200.581	452.523	395.613	224.947	75.141
População estimada 2014 (IBGE, 2010)	24,052	22,865	38,122	16,131	11,833
IDH – Índice de desenvolvimento humano (PNUD, 2010)	0.592	0.598	0.561	0.551	0.578
PIB per capita a preços correntes – 2012 (R\$)	6,427.57	5,158.35	6,385.69	4,943.30	4,764.60
Densidade demográfica (hab./km ²)	119.91	50.52	96.36	71.71	157.47
Geração per capita (SEMAS, 2012) (kg/hab/dia)	0.39	1.04	0.61	1.22	0.71
Geração de Resíduos 2012 (t)	3,284.58	8,519.36	8,320.65	6,746.30	2,971.93
Compostáveis (%) (SEMAS, 2012)	58.31	58.31	58.31	58.31	62.55
Geração de Resíduos Compostáveis 2012 (t)	1,915	4,968	4,852	3,934	1,859
Recicláveis (%)	25.24	25.24	25.24	25.24	17.86
Geração de Resíduos Recicláveis 2012 (t)	829	2150	2100	1703	531
Rejeitos (%)	16.46	16.46	16.46	16.46	19.59
Geração de Rejeitos 2012 (t)	541	1402	1370	1110	582

Fonte: IBGE (2010); SEMAS (2012).

Amostragem e coleta dos resíduos

A composição gravimétrica foi realizada com base na metodologia portuguesa, Portaria nº 851/2009 utilizada pela Comunidade Econômica Europeia (CEE). A metodologia é eficaz na identificação do potencial de aproveitamento dos materiais para fins de reciclagem, aproveitamento e energia. Assim, os resíduos foram coletados imediatamente após o descarrego, seguindo metodologia de quarteamento descrita em Mariano *et al.* (2007) conforme apresentado na Figura 2. O procedimento foi aplicado a um veículo coletor de cada município participante do aterro COMAGSUL.

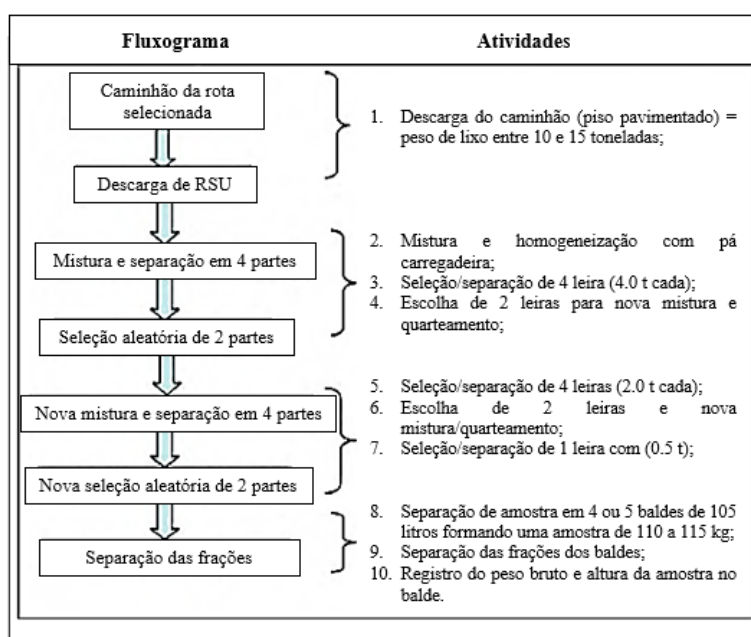


Figura 2. Fluxograma da metodologia de caracterização dos resíduos por quarteamento. Fonte: Mariano *et al.* (2007).

Após o quarteamento, foi retirada uma fração de resíduos para análise físico-química. Esta amostra foi utilizada para determinação do teor de umidade inicial das amostras, pH, condutividade elétrica e determinação de sólidos voláteis.

Ferramenta de apoio a decisão Índice de Sustentabilidade Tecnológica (IST)

Para definir as possíveis rotas tecnológicas de tratamento e disposição final, foram estudadas seis opções de tecnologias (aterro sem aproveitamento energético, aterro com aproveitamento energético, central de triagem, central de compostagem, digestão anaeróbia com aproveitamento energético e incineração com aproveitamento energético). As rotas tecnológicas são utilizadas na ferramenta de apoio à decisão ISW 1.0 e visam identificar as tecnologias que poderão participar do tratamento dos RSU.

Para a determinação das rotas, o software denominado Índice de Sustentabilidade Tecnológica-IST- Versão 1.0 foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa “Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Japão e Estados Unidos”, desenvolvido pela Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco – FADE e mais 63 consultores espalhados pelas diversas regiões do país e alguns países do mundo.

A ferramenta tem como objetivo facilitar a utilização do índice de sustentabilidade ambiental – IST, formulada em fevereiro de 2014, concebido para servir como ferramenta de apoio a decisão das soluções das tecnologias a serem utilizadas em rotas de tratamento de RSU.

Para implementação da ferramenta, foi realizado a formulação de um algoritmo com uma sequência lógica, finita e definida de instruções necessárias visando direcionar na complexidade da formulação do problema até a determinação da condição verificada que consta no manual técnico do usuário (FADE/UFPE, 2014).

O algoritmo apresenta-se dividido em cinco módulos sequencias, considerando sugestões de rotas tecnológicas, observando inicialmente cinco opções de tecnologias: aterro sem aproveitamento energético, aterro com aproveitamento energético, central de triagem, central de compostagem e digestão anaeróbia com aproveitamento energético. Outras tecnologias de tratamento não são utilizadas neste programa, considerando a inexistência de dados para avaliação, recursos disponíveis no município para o gerenciamento dos resíduos e a baixa utilização no país. Além disso, a ferramenta viabiliza a exclusão de tecnologias.

A ferramenta foi dividida em módulos para a facilitação da entrada de dados: módulo de inicialização, inserção das características dos RSU e cálculo do índice de sustentabilidade tecnológica (IST). O IST é composto pelos sub-índices Ambiental (AM), Econômico (EC) e Social (SO), sendo cada sub-índice composto por oito indicadores, totalizando 24 indicadores para a composição do IST. A Tabela 2 apresenta as faixas de IST e sua classificação.

Tabela 2. Faixas de Classificação do IST.

Faixas	Classificação
0.9 a 1	Excelente
0.8 a 0.9	Muito bom
0.7 a 0.8	Bom
0.6 a 0.7	Regular
0.5 a 0.6	Tolerável
0.4 a 0.5	Ruim
<0.4	Muito ruim

Fonte: Coelho (2011).

O método Mín-Máx permite que os indicadores sejam convertidos para valores entre zero e um a partir de valores máximos e mínimos de referência (*benchmarks*), sendo assim, permitirá a normalização utilizando-se duas equações: uma aplicada quando um aumento do valor do indicador atua favoravelmente ao crescimento do índice, e outra utilizada na normalização de indicadores cujo aumento de seu valor reduz o valor do índice (Equações 1 e 2).

$$q = \frac{x_{\text{variável}} - \text{mín}}{\text{máx} - \text{mín}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$q = 1 - \left(\frac{x_{\text{variável}} - \text{mín}}{\text{máx} - \text{mín}} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

No qual:

q: valor normalizado do indicador;

$x_{\text{variável}}$: indicador não normalizado;

mín: valor do benchmark inferior (valor mínimo);

máx: valor do benchmark superior (valor máximo).

A formulação matemática do índice agregará os indicadores na combinação para o cálculo final do IST. Assim sendo, serão usados o Somatório e o Produto (Equações 3 e 4).

$$IST = \sum_{i=1}^n w_i q_i \quad \text{Equação (3)}$$

$$IST = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad \text{Equação (4)}$$

No qual:

w_i : peso atribuído a cada indicador cujo somatório é igual a 1;

q_i : valor normalizado do indicador;

i: indicador de desempenho ambiental da tecnologia de tratamento de resíduos sólidos incluído no índice;

n: número total de indicadores do índice

Assim, após a análise da ferramenta, considerando os aspectos socioeconômicos, ambientais e de políticas públicas, o usuário da ferramenta poderá realizar conclusões que enfatizem a melhor tecnologia a ser aplicada para o município ou a melhoria da tecnologia utilizada no cenário atual. São apresentadas nas Figura 3 e 4 a forma ilustrativa da metodologia de aplicação do algoritmo preliminar da ferramenta de decisão.

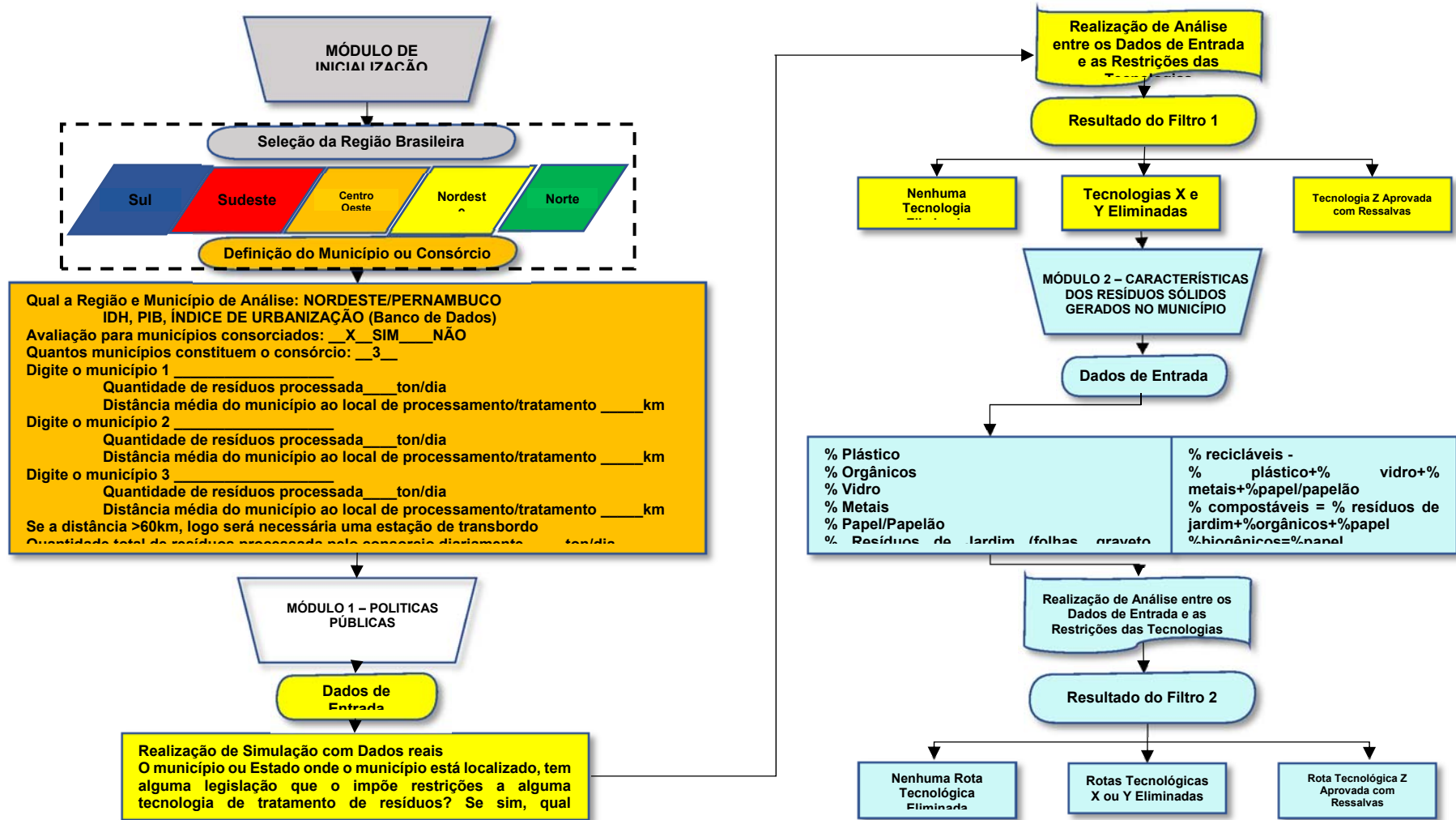


Figura 3. Parte 1 do algoritmo preliminar da ferramenta de apoio a decisão. Fonte: Firmo et al. (2012).

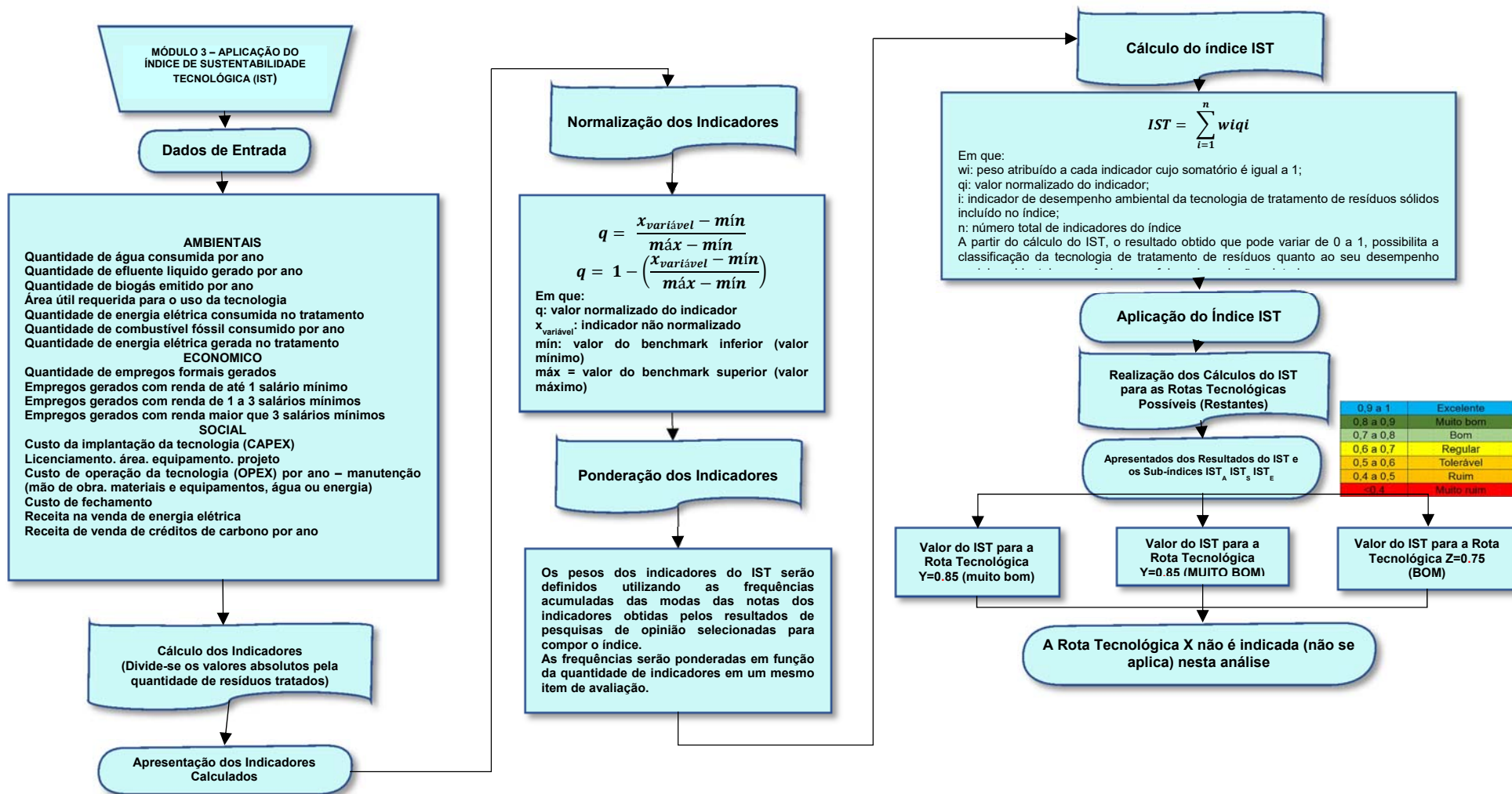


Figura 3. Parte 2 do algoritmo preliminar da ferramenta de apoio a decisão. Fonte: Firmo et al. (2012).

Resultados e discussão

Os resultados apresentados nesta pesquisa compõem parte da pesquisa de mestrado desenvolvida por Melo (2015).

Geração per capita e geração anual de resíduos

Foi observado a partir de dados coletados *in loco* no aterro do COMAGSUL que, entre janeiro de 2012 e fevereiro de 2015 que foram depositadas 48,040.046 toneladas de RSU. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos de acordo com os respectivos municípios integrantes.

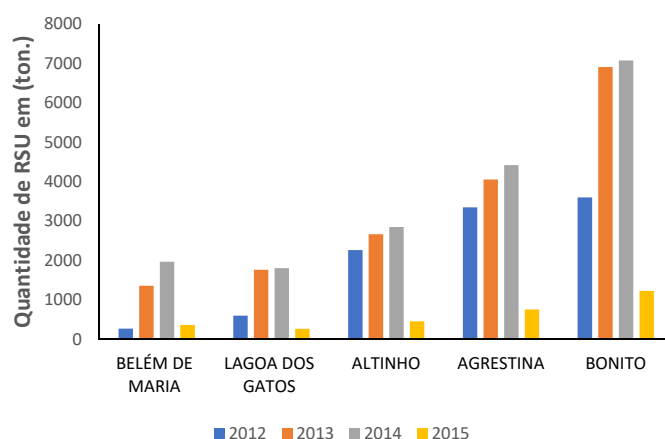


Figura 5. Quantidade de RSU dispostos no aterro sanitário do COMAGSUL entre os anos de 2012, 2013, 2014 e janeiro/ fevereiro de 2015. *Fonte: (Melo, 2015).*

Os resultados referentes à geração per capita de resíduos demonstraram que todos os cinco municípios que depositam resíduos no aterro sanitário do COMAGSUL apresentaram uma geração média per capita de 0.441 kg/habitante.dia⁻¹. A Tabela 3 apresenta os resultados de geração *per capita* de cada município no ano de 2014.

Tabela 3. Quantidade de RSU dispostas no aterro do COMAGSUL em 2014 e geração per capita.

Municípios	Quantidade mensal de RSU média em 2014 (toneladas)	Quantidade de RSU segundo PERS (kg/dia)	População atendida nos municípios do consórcio do aterro (habitantes)	Geração média de RSU per capita em kg/habitante.dia ⁻¹
Agrestina	367.95	12,265.2	22,679	0.541
Altinho	240.9	8,030.1	22,865	0.351
Bonito	588.19	19,606.4	37,566	0.522
Belém de Maria	157.94	5,264.6	11,353	0.464
Lagoa dos Gatos	152.25	5,074.9	15,615	0.325
TOTAL	1,507.23	50,241	110,078	0.441

Fonte: (Melo, 2015).

Composição gravimétrica dos resíduos

No que concerne aos ensaios de composição gravimétrica, foram coletados 1138 kg de RSU dos municípios de Altinho, Agrestina, Belém de Maria, Bonito e Lagoa dos Gatos. Os resíduos coletados apresentaram maior predominância do componente orgânico, este resultado pode ser decorrente dos baixos graus de desenvolvimento econômico observados nos municípios. A Tabela 4 apresenta de forma detalhada os resultados de composição gravimétrica dos resíduos depositados no aterro sanitário de cada município consorciado.

Tabela 4. Composição gravimétrica dos RSU dos municípios do COMAGSUL.

Classes de resíduos	Bonito	Agrestina	Belém de Maria	Altinho	Lagoa dos Gatos
Madeira/coco	6.6%	7.9%	5.7%	0.6%	8.7%
Compósitos	1.8%	0.7%	3.5%	2.1%	2.0%
Resíduos de Jardim	1.1%	2.7%	2.5%	2.3%	2.4%
Metais	1.5%	0.7%	0.2%	2.2%	1.2%
Bio resíduos (orgânicos)	28.8%	30.2%	31.7%	24.5%	42.7%
Outros (resíduos não identificados)	14.9%	17.5%	11.2%	5.8%	5.0%
Papel/cartão	7.7%	7.5%	7.8%	5.3%	4.1%
Resíduos perigosos	1.0%	0.6%	0.4%	0.4%	0.9%
Plástico	18.9%	14.1%	21.1%	24.3%	15.0%
Têxteis/Sanitários	10.1%	9.1%	11.4%	22.2%	13.4%
Têxteis	6.6%	7.6%	4.2%	8.0%	4.0%
Vidro	1.0%	1.5%	0.4%	2.3%	0.7%

Fonte: (Melo, 2015).

Caracterização Físico-Química

Nesse estudo a umidade foi realizada para resíduos in natura logo após o descarregamento e apresentou um percentual de 38.31%. Firmo (2013), ao realizar esta análise em resíduos novos na Região Metropolitana do Recife, em um período chuvoso, encontrou um percentual de 70%. Tchobanoglous *et al.* (1993) afirmam que resíduos em estado de biodegradação apresentam faixa de umidade entre 15 e 40 %, e neste sentido, observa-se que a umidade se encontrava dentro da faixa estipulada pela literatura para a biodegradação.

O teor de Sólidos Voláteis (SV) obtidos para os RSU do aterro sanitário do COMAGSUL, apresentaram-se acima de 59%, semelhantes ao descrito Machado *et al.* (2009) que quantificou o SV em resíduos recém-chegados ao aterro em 53.42%.

Os aspectos de condutividade elétrica e pH são parâmetros que influenciam diretamente na capacidade de biodegradabilidade da matéria orgânica dos resíduos (Firmo, 2013, apud Pohland; Harper, 1985; Schalch, 1992). O pH obtido para os resíduos sólidos do aterro sanitário do COMAGSUL a 25°C apresentou um resultado de 4.86. Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), a faixa ótima de pH para o crescimento bacteriano está compreendido entre 6.5 e 7.5.

Segundo McCarty (1964, apud Alcântara, 2007), valores de pH abaixo de 6.2 inibem fortemente a atividade das metanogênicas. Além disso, valores entre 4.5 e 5.0 podem inibir, também, a atividade dos microrganismos fermentativos. Logo, pode-se afirmar que o pH encontrado no COMAGSUL está inibindo a atividade dos microrganismos.

A condutividade é fundamental para a compreensão da fase de estabilização da matéria orgânica dos resíduos. Soluções de compostos inorgânicos são bons condutores, enquanto as de compostos orgânicos são mal condutores de corrente elétrica. O valor obtido no aterro sanitário do COMAGSUL coloca os resíduos em uma fase de transição, visto que a 25°C obteve-se uma condutividade elétrica de 2457 uS/cm.

Cenários obtidos com a ferramenta de apoio a decisão

Para a realização dos cenários, foram realizadas simulações utilizando os dados de composição gravimétrica realizada no aterro de Altinho. A ferramenta de apoio utilizada neste estudo considera como fatores que influenciam na instalação de uma unidade de transbordo, além da distância entre o centro gerador de resíduos de cada município, a composição gravimétrica dos resíduos e a quantidade de resíduos gerados até a instalação de disposição final.

Em relação à distância do centro de massa e a instalação de tratamento, o município de Bonito localiza-se a 30 km, seguido de Belém de Maria 26 km, Lagoa dos Gatos 24 km, Agrestina 7.2 km e Altinho a 5 km. A ferramenta considerou desnecessária uma estação de transbordo para os municípios de Altinho, Belém de Maria, Bonito e Lagoa dos Gatos e inadequada para Agrestina, conforme apresentado na Tabela 5. Ao tratar a tecnologia como desnecessária, a ferramenta atribui que sua implementação é uma extrapolação da utilização das tecnologias, uma vez que, apesar da distância ser acima de 20 km, a quantidade de resíduos destes municípios é pequena, o que não justifica financeira e operacionalmente uma instalação deste tipo. Quando a ferramenta atribui para alguma tecnologia o termo inadequado, está indicando que esta opção tecnológica será obrigatoriamente excluída dos cálculos dos índices e sub-índices (ambiental, econômico e social), esse fato ocorreu pois o aterro localiza-se na cidade de Agrestina, sendo eliminada a necessidade de análise de transbordo em casos assim.

Tabela 5. Resultado da ferramenta para a necessidade de uma estação de transbordo (*Software IST 1.0, 2013*).

Cidade	Transbordo
Agrestina	Inadequado
Altinho	Transbordo desnecessário
Belém de Maria	Transbordo desnecessário
Bonito	Transbordo desnecessário
Lagoa dos Gatos	Transbordo desnecessário

Fonte: (Melo, 2015).

Análises das tecnologias

A Tabela 6, apresenta os resultados dos sub-índices calculados de cada tipo de tecnologia estudada como forma de tratamento dos resíduos sólidos que são depositados no aterro sanitário.

Tabela 6. Sub-índices calculados (*Software IST 1.0, 2013*).

Sub-índice	Sigla	Compostagem	Digestão Anaeróbia com Aproveitamento Energético	Aterro Sanitário sem aproveitamento energético	Aterro Sanitário com aproveitamento energético	Incineração com aproveitamento energético	Central de Triagem	Estação de Transbordo
Ambiental	AM	0.961	0.917	0.606	1.008	0.563	0.987	0.952
Econômico	EC	0.775	0.768	0.901	1.028	0.513	0.934	0.995
Social	SO	0.514	0.293	0.411	0.386	0.130	0.859	0.577

Fonte: (Melo, 2015).

A tabela 7, mostra a classificação dos sub-índices por tecnologia levando em consideração a classificação do IST, podendo atribuir conceitos a cada tecnologia.

Tabela 7. Faixa de classificação dos sub-índices por tecnologia baseada na faixa de classificação do IST.

Sub-índice	Sigla	Compostagem	Digestão Anaeróbia com Aproveitamento Energético	Aterro Sanitário sem aproveitamento energético	Aterro Sanitário com aproveitamento energético	Incineração com aproveitamento energético	Central de Triagem	Estação de Transbordo
Ambiental	AM	Excelente	Excelente	Regular	Excelente	Tolerável	Excelente	Excelente
Econômico	EC	Bom	Bom	Excelente	Excelente	Tolerável	Excelente	Excelente
Social	SO	Tolerável	Muito Ruim	Ruim	Muito Ruim	Muito Ruim	Bom	Tolerável

Fonte: (Melo, 2015).

Com a utilização dos critérios acima descritos e em função das características dos resíduos sólidos dos municípios que depositam no aterro sanitários do COMAGSUL, a ferramenta considerou que as tecnologias de compostagem, aterro sem aproveitamento energético e central de triagem adequadas para o consórcio, isto corresponde à metade (50%) das tecnologias disponíveis no programa.

As tecnologias restantes foram consideradas inadequadas: digestão anaeróbia com aproveitamento energético, aterro com aproveitamento energético e incineração com aproveitamento energético.

Rotas tecnológicas

Para o cálculo das rotas tecnológicas possíveis para o COMAGSUL, foi utilizado o valor do índice de Sustentabilidade Tecnológica (IST) para as tecnologias adequadas (central de triagem, compostagem e aterro sanitário sem recuperação energética). Estas rotas tecnológicas foram obtidas considerando o cenário com coleta indiferenciada dos RSU.

A ferramenta de apoio a decisão apresentou ao final da simulação cinco rotas tecnológicas possíveis conforme apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Rotas sugeridas pela ferramenta com o benchmark preliminar (*Software IST 1.0, 2013*).

Rota Tecnológica	IST	Tecnologias
Rota 1	0.74	Aterro Sanitário
Rota 2	0.58	Centra de Triagem
Rota 3	0.58	Central de Triagem Compostagem Aterro Sanitário
Rota 4	0.58	Central de Triagem Aterro Sanitário
Rota 5	0.58	Central de Triagem Compostagem

Fonte: (Melo, 2015).

A rota tecnológica com maior valor de IST foi a do aterro sanitário sem aproveitamento energético. Esta rota é justificada pela pequena quantidade de resíduos e a existência de baixo teor de matéria orgânica, além disso a grande quantidade de rejeitos favorece o estabelecimento de aterros sanitários sem aproveitamento energético no Brasil. Além disso o porte socioeconômico dos municípios analisados também favorece a instalação dessa tecnologia, bastante difundida no país. Apesar de ter sido a rota tecnológica com maior IST é importante salientar que a mesma não representa uma priorização dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos e considera que todo resíduo é rejeito.

Segundo Brito (2013), apesar de no Brasil existir uma dependência da deposição dos RSU em aterros, já existem políticas de valorização que indicam o uso da reciclagem e da compostagem, visto a importância do retorno dos materiais, visando mitigar os impactos ambientais. Assim, a composição da compostagem nos fluxogramas após o descarte dos resíduos em centrais de triagem é de extrema importância para a composição da rota tecnológica.

Conclusão

Para a escolha de qualquer tecnologia e rota tecnológica são necessários estudos mais aprofundados de geração e composição gravimétrica dos resíduos. A utilização de ferramentas de apoio à decisão é bastante útil para apresentar as tecnologias e os possíveis indicadores ambientais, econômicos e sociais, porém sempre é necessário correlacionar as tecnologias apresentadas pela ferramenta com os aspectos sociais, ambientais e econômicos dos municípios.

Para o período de 2001 a 2014, foi observado uma redução da geração per capita dos resíduos sólidos urbanos nos municípios estudados. A única exceção corresponde ao município de Agrestina. Indicando a importância deste estudo para a escolha da tecnologia de tratamento de resíduos, uma vez que a quantidade de resíduos é um fator limitante de diversas tecnologias.

Com relação ao estudo de rotas tecnológicas de tratamento de RSU, conclui-se que avaliação por sub-indicadores ambiental, econômico e social apresenta ao tomador de decisão um maior esclarecimento sobre as tecnologias. Identificou-se que a melhor rota tecnológica com maior IST foi a utilização de aterro sem aproveitamento energético. Contudo vale destacar as rotas contemplando central de triagem, compostagem e aterro sem aproveitamento energético. Vale ressaltar que a tecnologia de aterro sanitário deverá estar presente em qualquer rota tecnológica já que nele será depositado os rejeitos de qualquer outro tratamento.

Referências Bibliográficas

- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015*. São Paulo. Acesso em 03 de fevereiro de 2018, disponível em: <http://abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>
- Alcântara, P. B. (2007) *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese (doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco. Recife - PE.
- BDE, Base de Dados do Estado (2015). *Perfis dos municípios*. Acesso em 03 de fevereiro de 2015, disponível em: <http://www.bde.pe.gov.br/estruturacaogeral/perfilmunicipios.aspx>
- Brito, E. P. L. (2013) *Utilização de uma ferramenta de apoio a decisão visando auxiliar nos estudos de tecnologias de destinação final de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso na cidade do Recife*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE.
- Coelho, H. M. G. (2011) *Modelo para avaliação e apoio ao gerenciamento de resíduos indústrias*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG.
- Maiello, A., de Paiva Britto, A. L. N., Valle, T. F. (2018) Implementation of the Brazilian national policy for waste management. *Revista de Administração Pública*, **52**(1), 24.
- FADE/BNDES (2014) *Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. Projeto de Pesquisa Científica. Acesso em 13 de fevereiro de 2015, disponível em: <http://protegeer.gov.br/biblioteca/publicacoes/gestao-integrada-de-rsu/50-analise-das-diversas-tecnologias-de-tratamento-e-disposicao-final-de-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-europa-estados-unidos-e-japao>

- Fialho, M. A. (2011) *Aspectos de ordem institucional para a gestão de resíduos sólidos em áreas metropolitanas: o desafio da intermunicipalidade*. Tese (Doutorado em Geografia Humana) - Faculdade de Filosofia, letras e ciências humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- Firmo, A. L. B. Mariano, M. O. H., Maciel, F. J. M., Jucá, J. F. T. (2012) *Análise das diversas alternativas tecnológicas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. Núcleo Coordenador: Gestão da Informação. In: 2º Seminário do projeto BNDES/FADE-UFPE (Produto 3).
- Firmo, A.L.B. (2013) *Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos*. Tese (doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010) *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, PNSB*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Jardim, A., Yoshida, C., Filho, J.V.M. (2012) *Política nacional, gestão e gerenciamento de resíduos sólidos*, PUC-SP, Barueri, São Paulo: Manole.
- LIMA, J. D., Juca, J. F. T., Reichert, G. A., Firmo, A. L. B. (2014) Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil. *Engenharia Sanitária Ambiental, Rio Grande do Sul*, **19**(1), 33-42.
- Machado, S. L., Carvalho, M. F., Gourc, J. P., Vilar, O. M., Nascimento, J. C. (2009) Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste management*, **29**(1), 153-161.
- Mariano, M. O. H., Maciel, F. J. M., Fucale, S. P., Jucá, J. F. T., Brito, A. R. (2007) Estudo da composição dos rsu do projeto piloto para recuperação do biogás no Aterro da Muribeca/PE. *VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO2007*. Recife, PE.
- Melo, F. H. F. D. A. (2015) *Caracterização e estudo do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos em um consórcio municipal do estado de Pernambuco*. Tese (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru - PE.
- Mersoni, C., Reichert, G. A. (2017) Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. *Eng. sanit. ambient*, **22**(5), 863-875.
- Neto, P.N. (2013) *Resíduos sólidos urbanos: perspectivas de gestão intermunicipal em regiões metropolitanas*. São Paulo: Atlas.
- Philippi Jr., A.P., Romero, M.A., Bruna, G.C. (2004) *Curso de Gestão Ambiental, coleção ambiental*. Manole, Barueri, São Paulo.
- Reichert, G. A. (2013) *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação de ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS.
- SEMAS, Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade. (2012) *Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco*. Recife. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/PlanoResiduoSolido_FINAL_002.pdf
- Software IST 1.0. (2013) *Desenvolvida no âmbito do projeto: "Análises das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa Japão e Estados Unidos*. Disponível em: <http://protegeer.gov.br/biblioteca/publicacoes/gestao-integrada-de-rsu/50-analise-das-diversas-tecnologias-de-tratamento-e-disposicao-final-de-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-europa-estados-unidos-e-japao>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Virgil, S. (1993) *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F. (2002) *Handbook of solid waste management*. 2ª ed. New York, McGRAW-HILL, 2002.