

Res., Soc. Dev. 2019; 8(6):e4286788

ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i6.788>

Avaliação econômica e do potencial energético do biogás de aterro em Campinas - SP

Economic feasibility and the energetic potential from landfill gas in Campinas - SP

Evaluación económica y del potencial energético del biogás de aterro en Campinas - SP

Recebido: 22/11/2018 | Revisado: 12/12/2018 | Aceito: 31/03/2019 | Publicado: 31/03/2019

Lílian Carla Ferreira Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0687-1221>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: lilian.cffreitas@hotmail.com

York Castillo Santiago

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7286-6688>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: yorkcastillos@gmail.com

Natalia de Souza Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0749-1637>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: nataliaribeiro@id.uff.br

Taís Eliane Marques

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8661-0357>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: ambiental.marques@gmail.com

Jucimar Augusto Pinto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9506-5066>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: jucimar_augusto@hotmail.com

Diego Ignacio Nieto Mogollón

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6163-1573>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: diegoignaciounifei@gmail.com

Alex Takeo Yasumura Lima Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1883-2414>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: alex.takeo@uol.com.br

Resumo

A necessidade de um maior número de alternativas energéticas limpas somadas à problemática da coleta e disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) dos grandes centros urbanos, mostra a importância da gestão destes resíduos. Neste contexto, é fundamental o aproveitamento dos gases gerados no aterramento desses resíduos. No presente trabalho é realizada uma estimativa para a produção de biogás bem como a análise da viabilidade econômica da utilização do mesmo biogás gerado em um aterro e um patio de compostagem dimensionados para a cidade de Campinas – SP, entre os anos 2018 e 2038. Para a análise das emissões provenientes dos Gases de Efeito Estufa (GEE) utilizou-se o modelo de emissões de gás de aterro sanitário, em inglês Landfill Gas Emissions Model (LandGEM), e o modelo de redução de resíduos, em inglês Waste Reduction Model (WARM). No WARM foram analisados três cenários, sendo que o cenário C3 apresentou a maior redução de emissões de GEE e foi a segunda melhor opção para o consumo energético. O LandGEM possibilitou uma estimativa na produção de metano (CH₄), de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases. A quantidade de biogás gerada para os anos 20 anos de produção foi de 934,872,000 m³, correspondendo à vida útil do aterro. O estudo de viabilidade econômica para uma potência instalada de 4MW e considerando diferentes cenários com o preço do dólar variando entre R\$2.80 a R\$5.80, mostrou que a execução do projeto é rentável. Com relação às vantagens ambientais estão a redução nas emissões de GEE e a contribuição direta para uma efetiva gestão dos resíduos sólidos em grandes centros urbanos.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Aproveitamento energético; Biogás

Abstract

The need in the use of renewable energy added to the problem of collection and final disposal of Municipal Solid Waste (MSW) in large urban areas shows the importance of the correct management of this waste. In this context, the use of the gases generated from the degradation of these wastes is essential. In the present work an estimation is made for the biogas production as well as the economic feasibility of the use of the s biogas generated in a landfill and a composting yard sized for the city of Campinas - SP, between the years of 2018 and 2038. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) and the Waste Reduction Model were used to estimate the greenhouse gases (GHG) emissions. Three scenarios were analyzed using the WARM method and scenario 3 was the one that presented the greatest GHG emission reduction and the second-best scenario in terms of energy consumption. Also,

the LandGEM estimated the production of methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂) and other gases. The amount of biogas generated for the 20 years of production was 934,872,000 m³, corresponding to the life of the landfill. The study shows that an installed power of 4MW results in the installation of a financially viable enterprise to generate electricity with different dolar values that varies between R\$2.80 to R\$5.80. In addition, the environmental advantages are the reduction in GHG emissions and the contribution to an effective management of municipal solid waste in large urban areas.

Keywords: Municipal Solid Waste; Energetic recovery; biogas.

Resumen

La necesidad de un mayor número de alternativas energéticas limpias sumadas a la problemática de la colecta y disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de los grandes centros urbanos, muestra la importancia de la gestión de estos residuos. En este contexto, es fundamental el aprovechamiento de los gases generados en el aterramiento de esos residuos. En el presente trabajo es realizada una estimativa para la producción de biogás bien como el análisis de la viabilidad económica de la utilización del mismo biogás generado en un aterro y un patio de compostaje dimensionados para la ciudad de Campinas – SP, entre los años 2018 y 2038. Para el análisis de las emisiones proveniente de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) se utilizó el modelo de las emisiones de gas de aterro sanitario, en inglés Landfill Gas Emissions Model (LandGEM), y el modelo de reducción de residuos, en inglés Waste Reduction Model (WARM). En el WARM fueron analizados tres escenarios, siendo que el escenario C3 presentó una mayor reducción de emisiones de GEI y fue la mejor segunda opción para el consumo energético. El LandGEM posibilitó una estimativa en la producción de metano (CH₄), de dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases. La cantidad de biogás generada para los 20 años de producción fue de 934,872,000 m³, correspondiendo a la vida útil del aterro. El estudio de viabilidad económica para una potencia instalada de 4MW y considerando diferentes escenarios con el precio del dólar variando entre \$2.80 a R\$5.80, mostró que la ejecución del proyecto es rentable. Con relación a las ventajas ambientales están la reducción en las emisiones de GEI e la contribución directa para una efectiva gestión de los residuos sólidos en grandes centros urbanos

Palabras clave: Residuos Sólidos Urbanos; Aprovechamiento energético; Biogás

1. INTRODUÇÃO

Com o elevado crescimento populacional, bem como tecnológico e industrial, há o aumento da demanda de energia e da geração de efluentes e resíduos sólidos, acompanhado de impactos ao meio ambiente, especialmente o agravamento das emissões de poluentes. Considerando a necessidade de um maior número de fontes de energia limpa e a problemática

dos grandes centros urbanos devido à coleta e disposição final dos RSU, mostra-se a importância da gestão integrada destes resíduos. Logo, um manejo adequado e efetivo dos resíduos sólidos torna-se aspecto fundamental para saúde pública, na redução dos danos ao meio ambiente e para garantia do fornecimento de energia.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos promulgada pela Lei Federal nº 12,305/2010 garante o gerenciamento dos resíduos sólidos compreendendo um conjunto de ações exercidas, de modo indireto ou direto, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos (Brasil, 2010).

A geração de resíduos sólidos e efluentes domésticos está diretamente relacionada com a população urbana, seu padrão de vida e hábitos de consumo. Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018), o montante de RSU coletado no Brasil em 2017 foi de 71.6 milhões de toneladas, registrando um índice de cobertura de coleta de 91.2%. Este mesmo estudo apontou que 51.9% destes resíduos foram enviados para aterros sanitários, 22.9% para aterros controlados e 18% para lixões.

Atualmente existem diferentes alternativas para tratamento dos resíduos. De acordo com Ustohalova et al., (2005), quando se trata da gestão de resíduos, a deposição em aterros sanitários constitui-se o método mais econômico na eliminação dos RSU. Atualmente esta é a opção mais viável para o cenário brasileiro, pelo baixo custo de operação, manutenção, utilização do biogás, controle do percolado gerado pela atividade microbiana e possível reutilização posterior do local do aterramento para a população (parques, campos esportivos, etc) (Villas Bôas, 1990). Neste contexto encontra-se uma questão ambiental que é a geração do CH₄, em consequência desta prática. Logo, a utilização do biogás a partir do CH₄ é uma prática necessária e conveniente. A utilização do biogás como fonte renovável de energia, representa uma fonte de geração promissora.

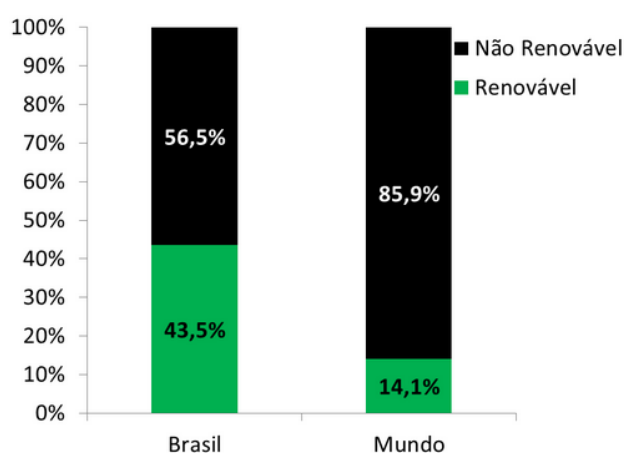
Os dois principais gases constituintes do biogás, CH₄ e CO₂ são considerados gases que contribuem para o aquecimento global. A gestão de resíduos representa uma das principais fontes emissoras de GEE (Liu et al., 2017). Diante disso, o aproveitamento energético destes resíduos colabora na redução das emissões destes gases.

O Brasil se destaca pela notável participação no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que se constitui uma das ferramentas do Protocolo de Quioto criados para auxiliar os países desenvolvidos a alcançar suas metas de redução de emissões de carbono e ainda aportar capital para países em desenvolvimento. Conforme Freitas et al., (2019), o uso de fontes renováveis são uma oportunidade de restringir o esgotamento dos recursos fósseis e

ainda reduz os impactos ambientais decorrentes do uso indiscriminado destas fontes não renováveis.

Estando em uma condição favorável em relação às fontes renováveis de energia, o Brasil apresenta uma diversificada matriz energética. Sendo composta por 43.5% de fontes renováveis e 56.5% de fontes de origem fóssil, apresentando grande diferença se comparado a composição da matriz energética mundial, onde apenas cerca de 14.1% é composta por fontes renováveis, conforme o Balanço Energético Nacional (BEN, 2017), e mostrado na Figura 1.

Figura 1: Matriz energética Brasileira e Mundial (%)



Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN, 2017).

Conforme Bove e Lunghi (2006 apud Barros, 2012), a prevenção da geração de RSU e a gestão integrada são habitualmente conhecidas pela comunidade da sociedade científica internacional, como o único caminho para redução da carga ambiental relacionada com a eliminação dos resíduos sólidos. O gerenciamento de RSU possui grande significância, pois inclui etapas articuladas e dependentes, desde a não geração até a disposição final dos resíduos, oferecendo condições para participação ativa e cooperativa dos setores do governo, iniciativa privada e sociedade civil. O gerenciamento de RSU é portanto, uma prática de extrema importância nas grandes cidades e cada vez mais tem se incentivado pesquisas nesta área no intuito de se determinar formas de tratamento de resíduos mais eficazes.

Apesar da grande quantidade de resíduos gerados no Brasil, o seu aproveitamento energético ainda é pequeno, diante do potencial existente e, como já citado anteriormente, os aterros sanitários são o método de disposição mais utilizado. Desta forma, o trabalho proposto torna-se importante ao fazer a análise de diferentes cenários para o gerenciamento de resíduos bem como apresenta a estimativa de seu potencial energético. A partir destas considerações a

pesquisa serve como base para mostrar que diferentes práticas de gerenciamento podem ser utilizadas e que o uso do biogás pode ser financeiramente atrativo, bem como ajuda na minimização dos impactos ambientais que seriam gerados por sua emissão.

Este trabalho tem como objetivo estimar a geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário na cidade de Campinas (SP), de acordo com a projeção populacional da região para os próximos 20 anos. Primeiramente estimou-se o crescimento da população da cidade no período citado, em seguida, estimou-se a geração de resíduos em cada ano. Posteriormente os dados obtidos através da geração de resíduos anual da cidade citada, bem como a análise da quantidade do biogás produzido, foi realizado o dimensionamento de um aterro sanitário e de um pátio de compostagem.

Logo após, utilizou-se a ferramenta WARM para comparar diferentes cenários de gerenciamento de resíduos. Além disso, os dados obtidos através da geração de resíduos foram inseridos no programa LandGEM para estimar a produção de biogás, obtendo assim a potência e a capacidade de geração de energia. Por último fez-se os cálculos da viabilidade econômica do projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10004 (ABNT, 2004), os Resíduos Sólidos são aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, provenientes de diversas atividades de origem industrial, hospitalar, comercial, serviços e de varrição. Nesta norma também são incluídos os lodos oriundos dos sistemas de tratamento de água, os resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, ou outros que exijam tratamentos e soluções técnicas para seu descarte adequado. A distribuição final dos RSU e sua disposição final constituem um grave problema ambiental não apenas no Brasil, mas em todo o mundo, pois os resíduos são comumente descartados a céu aberto nos lixões, portanto uma deposição correta destes resíduos, bem como sua utilização tende a crescer (Silva, et al., 2017; Santos, et al., 2018).

Sabe-se que o aterramento dos resíduos é considerado uma grande fonte de emissão de CH₄, e assim, uma possível grande fonte renovável para geração de energia elétrica, a partir do biogás. O Biogás pode ser definido como uma mistura de gases gerada pela decomposição anaeróbia. As características do biogás dependem da temperatura e pressão, variando com elas e com o teor de umidade. A grande vantagem da utilização do biogás como fonte de energia está no aproveitamento sustentável do subproduto da disposição dos resíduos sólidos

em aterros, e conseqüente redução do aumento das emissões para a atmosfera, do gás metano nele contido.

A composição dos gases gerados nos aterros depende das características dos resíduos e de suas fases de decomposição. Os componentes principais dos gases de aterro são CH₄ e CO₂. O biogás, no entanto, é composto de 45% a 60% de CH₄, 35% a 50% de CO₂, e em pequenas quantidades, de outros elementos como N₂, H₂, H₂S, NH₃ (CASSINI et al., 2003).

Como o CH₄ possui maior potencial que o CO₂ para aumento do efeito estufa (Miguez, 2000), pois o CH₄ é mais eficiente na captura de radiação solar, a queima do biogás na produção de energia gera emissões evitadas deste gás. Estas emissões evitadas podem ser credenciadas para a geração de créditos de carbono, que serão certificados e comercializados no mercado (cenário entre países). De acordo com Meneguín (2012), um crédito de carbono equivale a uma tonelada de CO₂ que deixou de ser emitido para a atmosfera e aos demais gases reduzidos também são emitidos os créditos, através de uma equivalência entre os respectivos gases e o CO₂. Os créditos de carbono representam então, uma segunda fonte de receita para os aterros que geram energia por meio do biogás, complementando assim a receita oriunda da geração e comercialização da energia elétrica.

A tecnologia para geração de energia através do biogás no Brasil, ainda é incipiente e isolada, e considerando os anos de 1970 até 2010 este produto não recebeu valorização e importância devida (Freitas et al., 2019; Mathias, 2015). Portanto, esta tecnologia vem se desenvolvendo gradualmente (Santos, et al., 2018). Atualmente, existem plantas que utilizam o biogás em variados pontos no país. A Tabela 1 apresenta as cidades que possuem plantas de biogás e sua capacidade instalada para geração de energia.

Tabela 1. Plantas de Geração a partir do Biogás no Brasil

Plantas de Geração de Energia	Cidade-Estado	Capacidade Instalada (kW)
Salvador	Salvador – BA	19,73
São João Biogás	São Paulo – SP	21,56
Energ-Biog	Barueri – SP	30
Asja BH	Belo Horizonte – MG	4,278
Arrudas	Belo Horizonte – MG	2,400
Ambient	Ribeirão Preto - SP	1,500
Biotérmica Recreio	Minas do Leão - RS	8,556
Uberlândia	Uberlândia - MG	2,852
Asja Sabará	Sabará - MG	2,852
CTR Juiz de Fora	Juiz de Fora - MG	4,278
Itajaí Biogás	Itajaí- SC	1,065
Termoverde Caieiras	Caieiras - SP	29,547
Guatapar	Guatapar	5,704

Bandeirantes	São Paulo - SP	4,624
Curitiba Energia	Fazenda Rio Grande - PR	4,278
Tecipar	Santana de Parnaíba - SP	4,278
Ronaldo de Freitas Silva	Uberlândia - MG	120
Fazenda Nossa Senhora de Fátima	Perdizes - MG	175.2
Unidade Industrial de Aves	Matelândia - PR	160
Unidade Industrial de Vegetais	Itaipulândia - PR	40
ETE Ouro Verde	Foz do Iguaçu - PR	20
Star Milk	Céu Azul - PR	110
Fazenda da Luz	Abelardo Luz - SC	810
Granja Makena	Patrocínio - MG	80
Ajuricaba	Marechal Cândido Rondon - PR	80
Fazenda Nossa Senhora do Carmo	Ituiutaba - MG	80
Granja São Roque	Videira - SC	424
Cogeração Bio Springer	Valinhos - SP	848
Adelar Piaia	Três Passos - RS	100
Cetrel Bioenergia JB	Cachoeirinha - PE	874
Total		121,453.2

Fonte: Freitas et al., 2019.

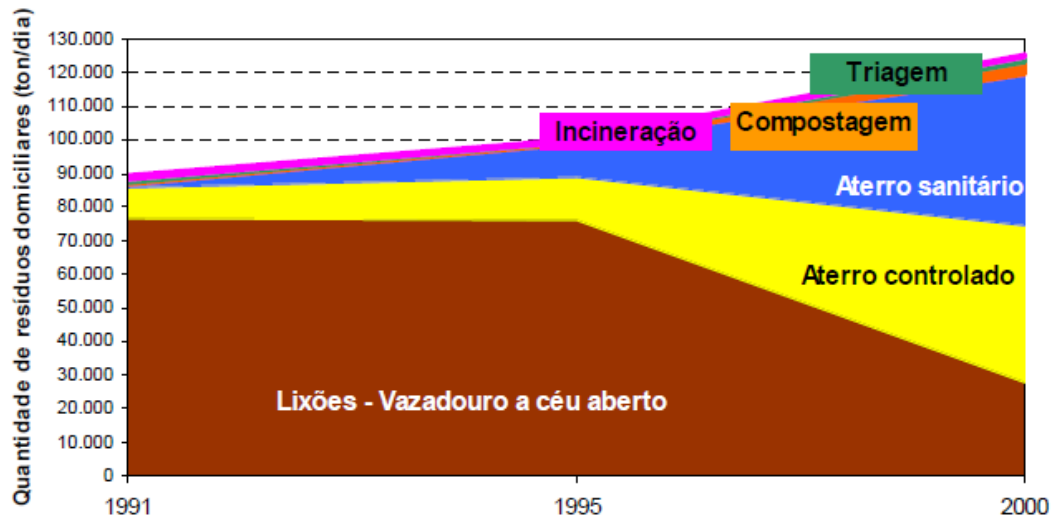
Conforme o Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada (IPEA, 2012), a distribuição dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos que são direcionados para aterros sanitários e controlados aumentou entre os anos de 2000 e 2008, de 39% e 26% para 60% e 20% respectivamente e os resíduos depositados em lixões reduziram de 35% para 20% para o mesmo período considerado.

De acordo com Jucá (2003), o aumento da geração de resíduos se acentuou na década dos anos 90, devido à diminuição dos índices inflacionários e ao consequente aumento no consumo. Houve então uma maior atenção à destinação final dos resíduos, o que é apresentado pela redução dos resíduos depositados em lixões e aumento dos resíduos depositados em aterros sanitários e controlados, conforme mostrado abaixo na Figura 2.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

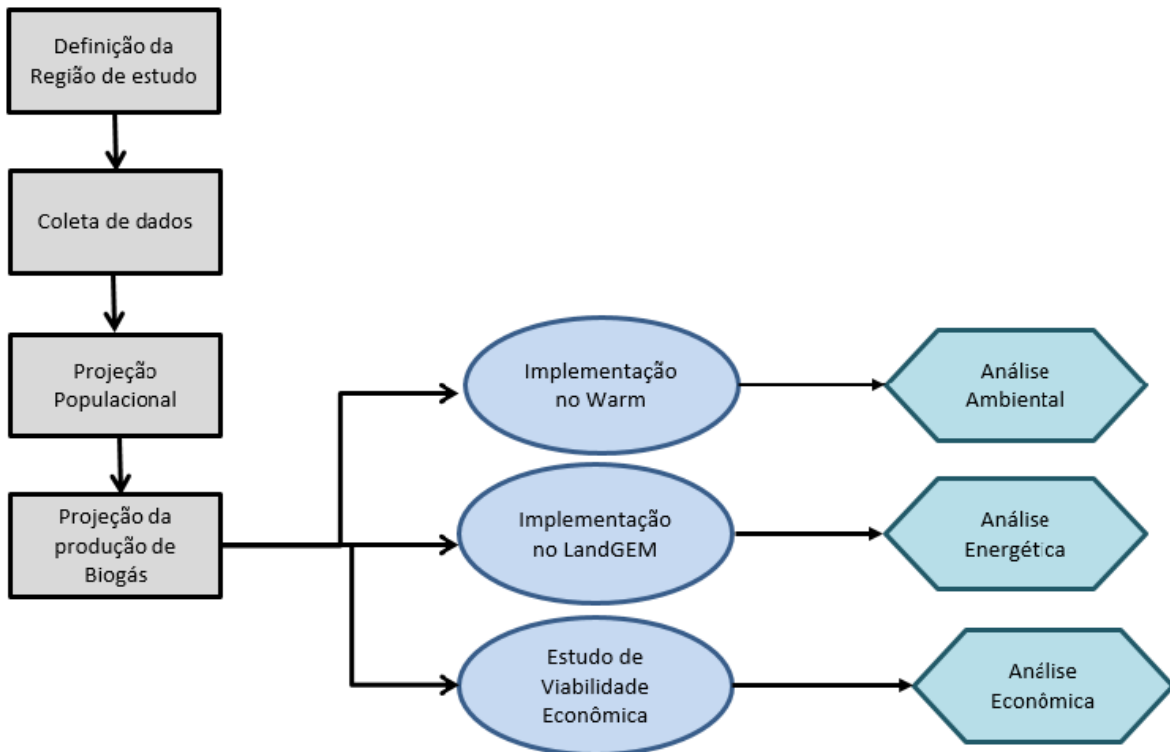
Após a definição da região de estudo, foi realizada a coleta de dados e estes foram utilizados para estimativa do crescimento populacional e para a produção de Biogás. Posteriormente foram utilizadas as ferramentas WARM e LandGEM para a análise ambiental e energética (baseado na produção do biogás), respectivamente. Finalmente é feita a análise de viabilidade econômica considerando os dados obtidos de população e produção de biogás. O trabalho seguiu a metodologia sequencial apresentada na Figura 3.

Figura 2. Evolução da destinação final dos resíduos no Brasil.



Fonte: Jucá, 2003.

Figura 3. Representação das etapas desenvolvidas no trabalho



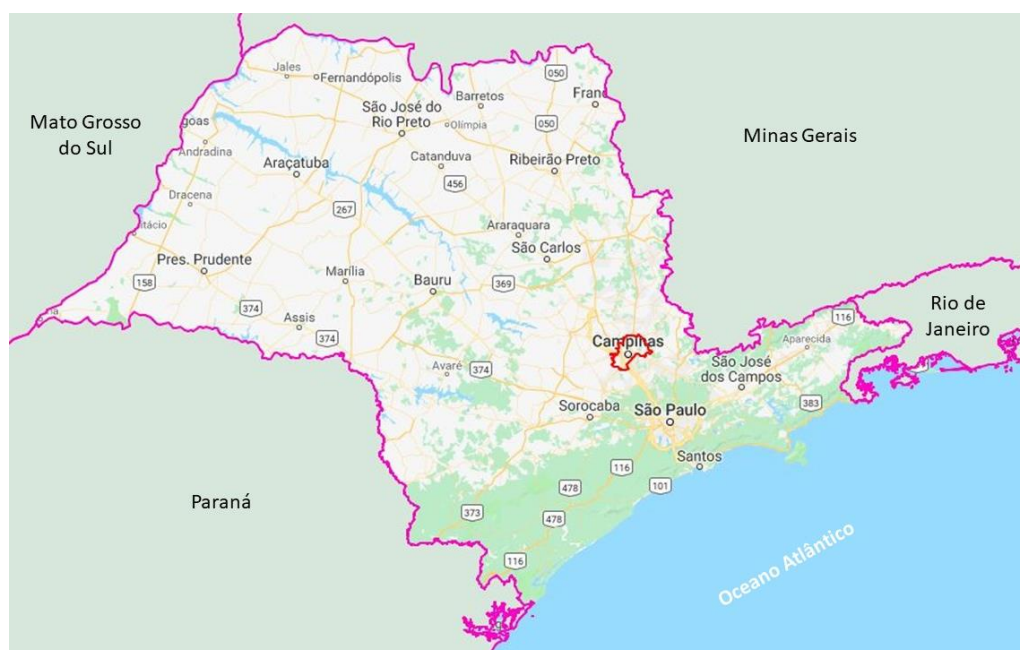
Fonte: Autores

3.1. Local de estudo

Campinas situa-se na porção centro-leste do Estado de São Paulo (47°03'33" Longitude Oeste e 22°48'57" Latitude Sul), a uma altitude média de 640 metros acima do nível do mar, localizando-se a noroeste da capital paulista São Paulo, como mostrado na Figura 4. Possui uma localização estratégica, e uma infraestrutura que favorece sua logística e desenvolvimento; possui no seu município o maior aeroporto de cargas do país, rodovias eficientes e uma rede ferroviária conectada com o porto de Santos.

Conforme dados da Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Social e Turismo da cidade de Campinas, o Produto Interno Bruto (PIB) de Campinas é de US\$ 18.8 bilhões, sendo formado por 6% de atividades industriais, 47.5% de comércio e 46.6% de serviços. Portanto a cidade é foco de investidores e grandes empresas de todo o mundo. O desenvolvimento e crescimento da população ocasiona o aumento da geração de RSU, sendo necessária a implementação do tratamento de RSU e políticas de gerenciamento ambiental.

Figura 4: Localização da cidade de Campinas



Fonte: Autores

3.2 Projeção Populacional e da produção de RSU

Para conhecer a quantidade de resíduos gerados durante um período de tempo, é necessário realizar uma estimativa populacional durante os anos de funcionamento do aterro

sanitário. Segundo Barros (2012), muitos modelos de crescimento populacional incluem o conceito de uma população estável que possui uma característica conhecida como coeficiente K_s , a qual pode ser também calculada adotando-se três dados da série histórica, conforme preconizado por Qasim (1985) e Von Sperling (2005). Dentre estes modelos utilizados para estimar populações futuras destacam-se: a projeção aritmética, projeção geométrica, taxa decrescente de crescimento e o crescimento logístico.

Ao descrever os métodos de projeção populacional considerou as seguintes nomenclaturas:

- t_0, t_1, t_2 = anos cujas populações são conhecidas;
- P_0, P_1, P_2 = populações nos anos t_0, t_1, t_2 ;
- P_t = população estimada no ano t (hab);
- P_s = população de saturação (hab);
- K_a, K_g, K_d, c = coeficientes.

De acordo com Qasim (1985) apud Von Sperling (2005) a projeção aritmética parte do princípio de taxa constante de crescimento, este método é utilizado para estimativas de menor prazo.

$$P_t = P_0 + K_a \times (t - t_0) \quad (1)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0} \quad (2)$$

A projeção geométrica é uma função da população existente a cada instante num dado intervalo de tempo, utilizada para estimativas em curto prazo (Von Sperling, 2005).

$$P_t = P_0 \times e^{K_g \times (t - t_0)} \quad (3)$$

Ou ainda:

$$P_t = P_0 \times (1 + i)^{(t - t_0)} \quad (4)$$

$$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0} \quad (5)$$

Sendo que:

$$i = e^{K_g} - 1 \quad (6)$$

A taxa decrescente de crescimento preconiza que na medida em que a cidade cresce a taxa de crescimento diminui, sendo assim o valor de P_t tende a saturar (Von Sperling, 2005).

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \times [1 - e^{-K_d \times (t - t_0)}] \quad (7)$$

Onde:

$$P_s = \frac{2 \times P_0 \times P_1 \times P_2 - P_1^2 \times (P_0 + P_2)}{P_0 \times P_2 - P_1^2} \quad (8)$$

$$K_d = \frac{-\ln[(P_s - P_2)/(P_s - P_0)]}{t_2 - t_0} \quad (9)$$

Qasim (1985) apud Von Sperling (2005) afirma que o crescimento logístico populacional é determinado por uma relação matemática, que estabelece uma curva em forma de “S”. A população neste caso tende a um crescimento assintótico com valor de saturação.

$$P_t = \frac{P_s}{1 + c \times e^{-K_d \times (t - t_0)}} \quad (10)$$

Onde P_s é dado na Equação (8) e K_d pelo seguinte:

$$K_d = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln \left[\frac{P_0 \times (P_s - P_1)}{P_1 \times (P_s - P_0)} \right] \quad (11)$$

E o valor de “c” é dado por:

$$c = \frac{(P_s - P_0)}{P_0} \quad (12)$$

Os anos base estabelecidos foram 1991, 2000 e 2010, com base no censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e disponibilizados na sua plataforma através do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2010).

Com base nos dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS, 2014) e com a projeção populacional realizada, foi calculada a produção de RSU anual para o período de 2018 a 2038, considerando acréscimo de 1% ao ano na produção per capita, devido a esta tendência histórica de um maior consumo por parte da população à medida que os anos vão passando (Barros, 2012).

3.3 Dimensionamento de um aterro sanitário e do pátio de compostagem

Os cálculos para o dimensionamento do aterro sanitário e do pátio de compostagem foram realizados conforme Bidone e Povinelli (1999). Para o aterro sanitário calculou-se o volume de RSU gerado em 20 anos assumindo uma densidade média do lixo compactado de 0.7 ton/m³ e adotou-se a opção "aterro em trincheira" com altura útil de 5 m e taludes laterais de 1:1, com largura da base de 140m para cada trincheira, sendo utilizadas 10 trincheiras para o aterro. Com base na largura da base (L_b) e altura útil (h_{util}), calculou-se a largura útil na superfície (L_s) como é representado na equação (13):

$$L_s = L_b + (2 \times h_{util}) \quad (13)$$

Tendo o valor de L_s se pode calcular a área transversal do aterro (S_{tr}), tal como se indica na equação (14):

$$S_{tr} = \left(\frac{L_b + L_s}{2} \right) \times h_{util} \quad (14)$$

E com a equação (15) se pode calcular o comprimento da trincheira (L):

$$L = \frac{V_{rsu}}{S_{tr}} \quad (15)$$

Finalmente pode-se calcular a área superficial ocupada pela trincheira (S_{SU}) como é mostrado na equação (16):

$$S_{SU} = L_{total} \times L_s \quad (16)$$

O pátio de compostagem foi dimensionado considerando que 50% da massa de lixo gerada matéria orgânica (M_o) é propícia para este processo, onde inicialmente calculou-se o volume da leira de compostagem (V_L), sabendo que a densidade (δ) de 0.8 ton/m³ como é mostrado na equação (17):

$$V_L = \frac{M_o}{\delta} \quad (17)$$

Foram considerados que as leiras são de seção triangular e tem as seguintes dimensões: 1.5m de altura (h_{leira}) por 2.5m de largura (L_{leira}) como na equação (18):

$$S_{ST} = \frac{h_{leira} \times L_{leira}}{2} \quad (18)$$

Para o comprimento da leira (L_c), considerou-se os valores de V_L e S_{ST} como representou-se na equação (19):

$$L_c = \frac{V_L}{S_{ST}} \quad (19)$$

Conhecido o valor do comprimento da leira, é possível calcular a área da base da leira (S_{ba}) tal como é mostrado na equação (20).

$$S_{ba} = L_c \times L_{leira} \quad (20)$$

Onde área de folga para o reviramento da leira (S_{fo}) tem o mesmo valor que S_{ba} . Portanto, a área total ocupada pela leira (S_{Total}) como indica a equação (21):

$$S_{Total} = S_{fo} + S_{ba} \quad (21)$$

3.4 Cenários WARM

Para comparar diferentes cenários para o gerenciamento dos RSU utilizou-se a versão 14 do WARM desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, em inglês Environmental Protection Agency (EPA). O WARM é uma ferramenta que calcula e totaliza as emissões de GEE de diferentes práticas de gerenciamento de resíduos, como reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia e aterro. Este cálculo de emissões é feito com base numa ampla variedade de materiais comumente encontrados nos RSU (EPA, 2018).

A composição gravimétrica dos RSU no Brasil foi tomada com base nos dados do IBGE (2010) como é apresentado na Tabela 2, a qual fornece a composição dos diferentes tipos de resíduos utilizados nos cenários estudados. A quantidade de RSU utilizada foi a produção acumulada de RSU produzida pelo município de Campinas durante os 20 anos de estudo.

Tabela 2: Composição gravimétrica dos RSU no Brasil.

Resíduos	Composição (%)
Aço	2.3
Alumínio	0.6
Papel, papelão e tetra Pack	13.1
Plástico Total	13.5
Vidro	2.4
Matéria Orgânica	51.4
Outros	16.7
Total	100

Fonte: IBGE, 2010.

Os três cenários analisados são apresentados na Tabela 3, onde o aterramento de todo resíduo foi considerado como linha de base. Os resíduos chamados de “outros” foram considerados “Mixed MSW” no software WARM para todos os casos. Aço, Alumínio, papel, papelão, treta pack, plástico e vidro representam o 31% da participação total dos resíduos do Brasil e serão chamados de material reciclável.

Tabela 3: Distribuição dos cenários.

	Matéria orgânica	Material reciclável	Outros
Cenário 1	60 % compostagem 40 % aterro	80 % reciclados 20% aterro	100 % aterro
Cenário 2	50 % compostagem 50 % por digestão anaeróbia	80 % reciclados 10 % redução na fonte 10 % incineração	100 % aterro
Cenário 3	90 % compostagem 10 % incineração	70 % reciclados 30 % incineração	100% aterro

Fonte: Autores

O cenário 1 (C1) engloba o balanço entre o percentual de tratamento da parcela orgânica dos RSU pela compostagem e o volume encaminhado para o aterro, incluído uma alta taxa de reciclagem com vistas à redução de área a ser ocupada pelo aterramento dos resíduos. O cenário 2 (C2) considera o mesmo percentual de matéria orgânica enviada para compostagem e digestão anaeróbia. Também mantém uma alta porcentagem de reciclagem, sendo proposto um percentual mínimo de redução na fonte e de tratamento térmico. O cenário 3 (C3) privilegia o tratamento da matéria orgânica usando a compostagem, mantendo uma alta taxa de reciclagem para os resíduos recicláveis e mostrando pequena taxa enviada para o tratamento térmico para os dois tipos de resíduos.

3.5 LandGEM

O modelo LandGEM 3.02 constitui-se um modelo de emissão de gases em aterros sanitários, que foi criado pela EPA, mas que pode ser adaptado para outras regiões com cenários equivalentes. Conforme Barros (2012) constitui-se uma ferramenta automatizada que realiza a previsão da quantidade de biogás gerado no aterro, com uma interface do Microsoft Excel, da EPA

O modelo considera a emissão não apenas do gás de aterro, como também a emissão de outros componentes. Como a composição específica dos resíduos não é conhecida, o software permite a estimativa, utilizando parâmetros padrão para o cálculo das emissões (os valores de L_0 e K). Onde L_0 é o potencial de capacidade de geração do CH_4 (m^3/Mg) e de acordo com EPA, a média está entre 100 a 170 m^3/Mg . O valor de K representa a taxa de geração do CH_4 por ano; entre os valores de 0.04 m^3/Mg e 0.05 m^3/Mg (Silva et al., 2017). A

geração do CH₄ é calculada a partir da equação cinética, apresentada abaixo através da equação (22) e utilizada pelo software LandGEM (Silva et al., 2017).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] e^{-k t_{ij}} \quad (22)$$

Onde Q_{CH₄} é a geração anual de CH₄ por ano (m³/ano); i= incremento de tempo de 1 ano; n= (ano do cálculo) – (ano inicial do cálculo); j= incremento de tempo de 0,1 ano; k= taxa constante de geração de CH₄ (ano⁻¹); L₀= potencial de geração de CH₄ (m³Mg⁻¹); M_i= massa de resíduos sólidos disposta no primeiro ano i (Mg) e t_i= idade dos resíduos dispostos no primeiro ano i (anos).

3.6 Análise da viabilidade econômica

A análise da viabilidade econômica do aproveitamento foi feita para o período de 30 anos de vida útil do empreendimento energético, entre 2028 e 2057, considerando a construção da planta em 2027 com uma potência gerada de 4 MW. Utilizando como indicador econômico o Valor Presente Líquido (VPL). O VPL é calculado pela seguinte fórmula (Rodrigues & Melo, 2017):

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{R_j - C_j}{(1+i)^j} - I \quad (23)$$

Onde:

R_j = receitas do período j;
C_j = custos do período j;
i = taxa de juros;
n = período do projeto;
I = investimento inicial.

A viabilidade do empreendimento, conforme Rodrigues & Melo (2017) ocorre quando a VPL é acima de zero. Utilizou-se uma taxa de juros (SELIC) de 6.5% a.a. e a cotação do dólar de US\$ 1.00 para R\$ 3.757 para o dia 12 de novembro de 2018, conforme o Banco Central do Brasil (BACEN, 2018). Foi realizada uma análise da variação da cotação do dólar entre R\$ 2.80 a R\$ 5.80, de modo a verificar a viabilidade em um amplo espectro de valores.

Para o cálculo do custo de implantação da central, dado em dólares, utilizou-se a equação proposta por Silva et al., (2017):

$$\text{Custo (US\$)} = 4 \times 10^6 P + 258,311 \quad (24)$$

Onde P é a potência do aproveitamento, em MW.

O valor de venda da energia se baseia na Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015, sendo então adotada a tarifa de R\$ 509.74 apresentada na Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) e pela Companhia distribuidora Energética de Minas Gerais (CEMIG), entre 8 de abril de 2015 a 7 de abril de 2017. A resolução 687, regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que permite a cogeração, oriunda de fontes renováveis, com uma potência instalada menor ou igual a 5 MW.

Neste sistema de venda da energia gerada, esta é diretamente conectada na rede de distribuição e será contabilizada como créditos para o fornecedor, considerando o valor que este consumidor paga por kW consumido. Portanto é de interesse para os consumidores a geração de energia elétrica, uma vez que obterão descontos em sua energia consumida, de acordo com a energia que os mesmos produzirem. Os créditos são, então neste cenário, mais atrativos que a venda da energia elétrica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Projeção Populacional

A primeira etapa no dimensionamento de sistema de aproveitamento energético de biogás proveniente de aterro sanitário consiste no cálculo da projeção populacional do município. Com as estimativas de variação populacional a médio e longo pode-se considerar o quanto é viável tecnicamente e economicamente o empreendimento e estimar sua vida útil.

Para a realização da estimativa populacional do município de Campinas-SP foi estabelecida sua população de saturação. Baseado nos dados obtidos do Censo demográfico de 2010 e utilizando-se da metodologia enumerada no item 2.3 deste trabalho chegou-se aos resultados ilustrados na Tabela 4 e graficamente na Figura 5.

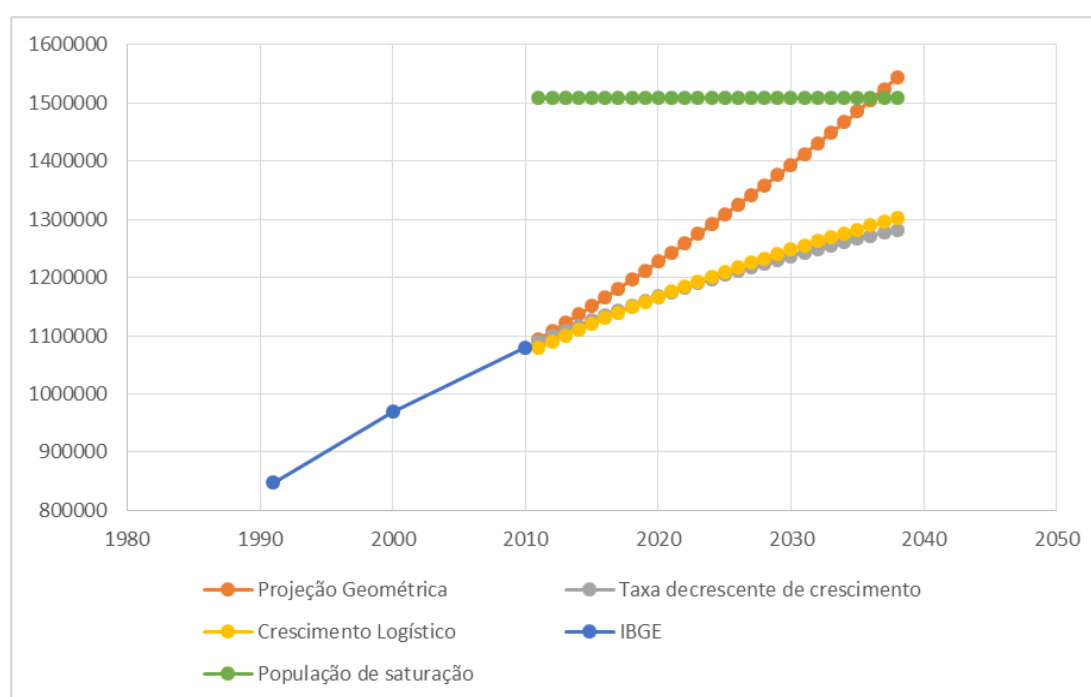
Tabela 4: Comparativo entre os métodos de projeção populacional.

Ano	Projeção Aritmética	Projeção Geométrica	Taxa decrescente de crescimento	Crescimento Logístico
1991	847,595	847,595	847,595	847,595
2000	969,396	969,396	969,396	969,396
2010	1,080,113	1,080,113	1,080,113	1,080,113
2011	1,092,351	1,093,982	1,089,780	1,080,113
2012	1,104,589	1,108,030	1,099,229	1,090,407
2013	1,116,826	1,122,257	1,108,465	1,100,546
2014	1,129,064	1,136,668	1,117,493	1,110,530
2015	1,141,302	1,151,263	1,126,317	1,120,356
2016	1,153,540	1,166,046	1,134,943	1,130,023
2017	1,165,778	1,181,019	1,143,374	1,139,528
2018	1,178,015	1,196,184	1,151,615	1,148,871
2019	1,190,253	1,211,544	1,159,670	1,158,050
2020	1,202,491	1,227,101	1,167,543	1,167,065
2021	1,214,729	1,242,857	1,175,239	1,175,914
2022	1,226,966	1,258,816	1,182,762	1,184,599
2023	1,239,204	1,274,980	1,190,115	1,193,117
2024	1,251,442	1,291,352	1,197,302	1,201,470
2025	1,263,680	1,307,933	1,204,327	1,209,658
2026	1,275,918	1,324,728	1,211,193	1,217,680
2027	1,288,155	1,341,738	1,217,905	1,225,538
2028	1,300,393	1,358,967	1,224,466	1,233,231
2029	1,312,631	1,376,417	1,230,879	1,240,762
2030	1,324,869	1,394,091	1,237,147	1,248,130
2031	1,337,107	1,411,992	1,243,274	1,255,337
2032	1,349,344	1,430,123	1,249,262	1,262,384

2033	1,361,582	1,448,486	1,255,116	1,269,273
2034	1,373,820	1,467,086	1,260,838	1,276,005
2035	1,386,058	1,485,924	1,266,431	1,282,582
2036	1,398,296	1,505,004	1,271,897	1,289,004
2037	1,410,533	1,524,329	1,277,241	1,295,275
2038	1,422,771	1,543,902	1,282,464	1,301,396

Fonte: Autores

Figura 5. Projeção Populacional para o município de Campinas – SP



Fonte: Autores

De acordo com o gráfico conclui-se que a população de saturação fica em torno de 1,500,000 habitantes, ou seja, a partir deste dado calculado a variação da população será mínima e o município terá alcançado a quantidade máxima em número de habitantes.

Para o tempo de projeto, estipulado em 20 anos, ou seja, de 2018 a 2038, considerando o crescimento logístico a população saltaria de 1,100,000 para cerca de 1,300,000.

A geração de RSU e Resíduos Domésticos (RDO) foram determinados, considerando a taxa decrescente da população, também considerando acréscimo de 1% ao ano na produção per capita. Desta forma a projeção de massa de RSU + RSO calculada por ano está ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5: Projeção em massa de RSU calculada por ano.

Ano	População	Geração per capita	kg/dia	Produção RSU+RDO		
				kg/ano	t/ano	Acumulado
2011	1,089,780	-	-	-	-	-
2012	1,099,229	-	-	-	-	-
2013	1,108,465	-	-	-	-	-
2014	1,117,493	1.03	1,151,018	420,121,506	420,122	420,122
2015	1,126,317	1.04	1,171,708	427,673,401	427,673	847,795
2016	1,134,943	1.05	1,192,488	435,258,028	435,258	1,283,053
2017	1,143,374	1.06	1,213,360	442,87,6261	442,876	1,725,929
2018	1,151,615	1.07	1,234,326	450,528,975	450,529	2,176,458
2019	1,159,670	1.08	1,255,389	458,217,049	458,217	2,634,675
2020	1,167,543	1.09	1,276,552	465,941,360	465,941	3,100,617
2021	1,175,239	1.10	1,297,816	473,702,790	473,703	3,574,319
2022	1,182,762	1.12	1,319,184	481,502,224	481,502	4,055,822
2023	1,190,115	1.13	1,340,659	489,340,546	489,341	4,545,162
2024	1,197,302	1.14	1,362,243	497,218,645	497,219	5,042,381
2025	1,204,327	1.15	1,383,938	505,137,412	505,137	5,547,518
2026	1,211,193	1.16	1,405,747	513,097,740	513,098	6,060,616
2027	1,217,905	1.17	1,427,673	521,100,525	521,101	6,581,716
2028	1,224,466	1.18	1,449,717	529,146,667	529,147	7,110,863
2029	1,230,879	1.20	1,471,882	537,237,066	537,237	7,648,100
2030	1,237,147	1.21	1,494,172	545,372,628	545,373	8,193,473
2031	1,243,274	1.22	1,516,587	553,554,262	553,554	8,747,027
2032	1,249,262	1.23	1,539,131	561,782,877	561,783	9,308,810
2033	1,255,116	1.24	1,561,807	570,059,389	570,059	9,878,869
2034	1,260,838	1.26	1,584,616	578,384,716	578,385	10,457,254
2035	1,266,431	1.27	1,607,561	586,759,779	586,760	11,044,014

2036	1,271,897	1.28	1,630,645	595,185,505	595,186	11,639,199
2037	1,277,241	1.29	1,653,871	603,662,821	603,663	12,242,862
2038	1,282,464	1.31	1,677,240	61,2192,662	612,193	12,855,055

Fonte: Autores

4.2 Resultado Dimensionamento de um aterro sanitário e do pátio de compostagem

De acordo com a projeção de massa de RSU gerada para o ano 2038, a área do pátio de compostagem obtida foi de 36.96 hectares e a área do aterro sanitário com 10 trincheiras foi de 217.50 hectares, o que resulta numa área total 254.46 hectares. Por outro lado, foi realizado o cálculo do aterro sem processos de compostagem dando como resultado uma área total de 435 hectares, o qual demonstra a importância que tem os pátios de compostagem na redução da área dos aterros sanitários.

4.3 Resultados WARM

A Tabela 6 indica os resultados obtidos a partir do WARM para os três cenários em relação às emissões totais de GEE calculadas como toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (MTCO₂eq).

Tabela 6: Comparação do CO₂eq produzido para os diferentes cenários.

	C1 - 2018	C1 - 2038	C2 - 2018	C2 - 2038	C3 - 2018	C3 - 2038
Emissões totais de GEE a partir da linha base (MTCO ₂ eq)	145,874.36	198,218.58	145,874.36	198,218.58	145,874.36	198,218.58
Emissões totais de GEE a partir do cenário (MTCO ₂ eq)	220,207.50	299,224.74	312,289.65	424,348.80	211,800.52	287,801.07
Incremento de emissões de GEE (MTCO ₂ eq)	366,081.86	497,433.31	458,164.00	622,567.37	357,674.88	486,019.65

Fonte: Autores

Observou-se que o C3 comparado à linha base, apresentou o menor valor para emissões de $\text{MTCO}_{2\text{eq}}$ para o ano de 2018 e projeção para 2038 cujos valores foram 211,800.52 e 287,801.07 respectivamente. Tal desempenho pode ser justificado devido ao percentual de aproveitamento da fração orgânica (90%) presente na massa dos resíduos, bem como a indicação de 70% dos materiais recicláveis para o processo de reciclagem. Não obstante a adoção do tratamento térmico para uma parcela menor dos resíduos contribuiu com a redução de material que seria encaminhado para o aterro.

Os usos energéticos a partir das alternativas de gestão dos RSU propostas pelos diferentes cenários são apresentados no Tabela 7.

Tabela 7: Comparação do uso de energia para os diferentes cenários.

	C1 - 2018	C1 - 2038	C2 - 2018	C2 - 2038	C3 - 2018	C3 - 2038
Uso de energia da linha de base (MWh).	35,413.38	48,120.79	145,874.36	48,120.79	145,874.36	48,120.79
Uso de energia dos cenários (MWh).	784,605.15	1,066,146.67	312,289.65	1,412.733.98	211,800.52	1,242,542.50
Incremento de uso da Energia (MWh).	820,018.53	1,114,266.46	458,164.00	1,460.854.77	357,674.88	1,290,573.29

Fonte: Autores

Nota-se um maior incremento do uso de energia do cenário C2 para o ano 2018 (458,164.00 MWh) e 2038 (1,460,854.77 MWh), uma vez que a digestão anaeróbia (50%) configura um incremento na geração de energia a partir do biogás produzido. O valor de uso de energia da linha base foi igual entre os cenários C2 e C3, mas para o C1 foi diferente devido à disposição da matéria orgânica no aterro.

A Tabela 8 apresenta as reduções nas emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ comparadas com fontes de emissão que utilizam combustível fóssil, representando assim os benefícios através dos tratamentos de resíduos.

Os resultados no Tabela 8 indicam que os cenários que exibem a melhor taxa de remoção de emissões anuais de veículos e de conservação no uso de combustíveis fósseis foram C1 e C3, o qual corrobora com as informações apresentadas nas Tabelas 6 e 7, sendo que esses dois cenários também apresentam um menor uso de energia e emissões de GEE para o ano 2038.

Tabela 8: Equivalência das reduções de emissões pelos cenários.

	C1 - 2018	C1 - 2038	C2 - 2018	C2 - 2038	C3 - 2018	C3 - 2038
Remoção de emissões anuais de automóveis	77,070	104,725	96,456	131,067	75,300	102,320
Conservação de galões de gasolina	41,192,962	55,974,267	51,554,406	70,053,716	40,246,976	54,688,832
Conservação de Cilindro de propano	15,253,411	20,726,805	19,090,167	25,940,307	14,903,120	20,250,816

Fonte: Autores

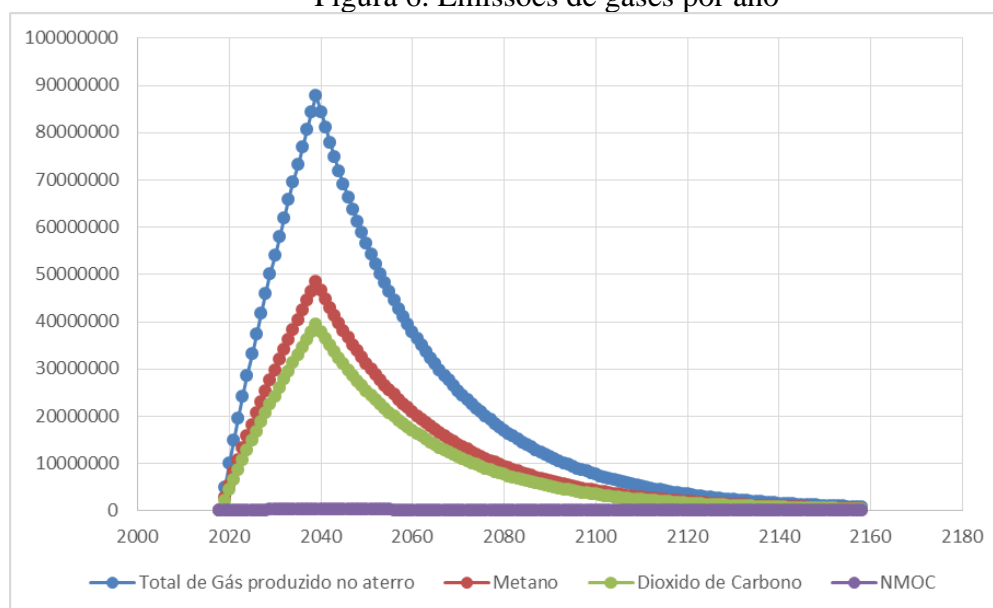
A análise global dos cenários apresentados permite concluir que com um maior percentual para a compostagem e reciclagem combinado ou não com a alternativa de tratamento térmico (incineração) para os resíduos é possível obter melhores resultados quanto à taxa de remoção de emissões anuais do setor de veículos e redução no uso de combustíveis fósseis. O percentual de aproveitamento da fração orgânica por digestão anaeróbia apresenta contribuição significativa para o aproveitamento energético dos resíduos a partir da produção do biogás e a redução do volume de material destinado a aterro.

4.4 Resultados obtidos pelo LandGEM

Foram utilizados os parâmetros $L_0=157 \text{ m}^3/\text{Mg}$, $k=0.04 \text{ m}^3/\text{Mg}$ por ano. A Figura 6 apresenta a taxa de geração anual de CH_4 obtida através do modelo LandGEM (dados em m^3).

A ferramenta LandGEM possibilitou uma estimativa da produção de CH_4 , de gás carbônico e de outros gases oriundos da decomposição dos RSU. O valor de biogás produzido entre os anos de 2018 e 2038 foi de $934,872,000 \text{ m}^3$, correspondendo à vida útil do aterro. Após este período, a quantidade do biogás começa a reduzir, pois não haverá novas deposições de massa orgânica no aterro. Deve ser ressaltado que o LandGEM considera que a emissão de CH_4 começará após o fim do primeiro ano de deposição da massa de RSU (Silva, 2012).

Figura 6. Emissões de gases por ano



Fonte: Autores

De acordo com Scharff e Jacobs (2006), o modelo LandGEM utilizado, possui a desvantagem de não considerar as diferenças na composição do conteúdo da massa orgânica do aterro. A grande variabilidade na composição dos gases produzidos é decorrente da composição diversificada dos resíduos, e estes por sua vez dependem de vários fatores como renda, classe econômica, atividade, etc. Para Yildiz et al., (2013), a quantidade e as características dos resíduos sólidos variam entre países, entre regiões de um mesmo país e também entre bairros de uma mesma cidade. A Tabela 9 apresenta os dados utilizados no LandGEM para os anos de atividade do aterro sanitário.

Tabela 9: Quantidade de gases gerados no aterro em (m³)

Ano	Total de Gás Produzido	Metano	Dióxido de Carbono	NMOC
2018	0	0	0	0
2019	5,038,000	2,777,000	2,260,000	20,150
2020	9,964,000	5,493,000	4,471,000	39,860
2021	14,780,000	8,150,000	6,633,000	59,130
2022	19,500,000	10,750,000	8,750,000	78,000
2023	24,120,000	13,300,000	10,820,000	96,480
2024	28,650,000	15,790,000	12,850,000	114,600
2025	33,080,000	18,240,000	14,840,000	132,300
2026	37,430,000	20,640,000	16,800,000	149,700
2027	41,700,000	22,990,000	18,710,000	166,800
2028	45,890,000	25,300,000	20,590,000	183,600

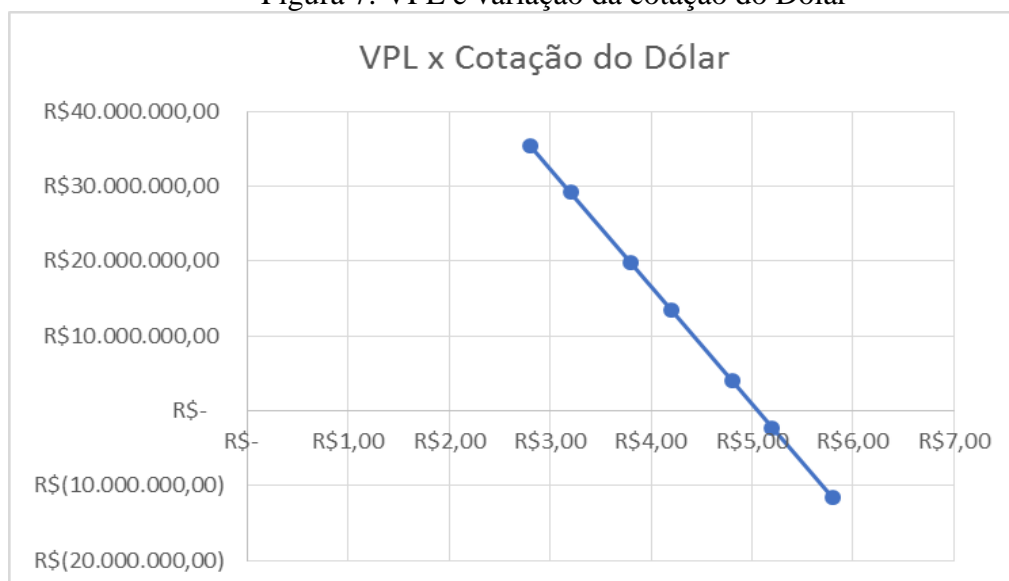
2029	50,010,000	27,570,000	22,440,000	200,000
2030	54,060,000	29,800,000	24,260,000	216,200
2031	58,040,000	32,000,000	26,040,000	232,100
2032	61,950,000	34,150,000	27,800,000	247,800
2033	65,800,000	36,280,000	29,530,000	263,200
2034	69,600,000	38,370,000	31,230,000	278,400
2035	73,340,000	40,430,000	32,910,000	293,300
2036	77,020,000	42,460,000	34,560,000	308,100
2037	80,660,000	44,470,000	36,190,000	322,600
2038	84,240,000	46,440,000	37,800,000	337,000
Total	934,872,000	515,400,000	419,484,000	3,739,320

Fonte: Autores

4.5 Resultados Viabilidade Econômica

O empreendimento mostra-se viável para uma ampla faixa de cotações do Dólar, passando a se inviabilizar em uma hipotética cotação acima de R\$ 5.058. Tal cotação de Dólar nunca foi atingida nos anos recentes, como pode se observar em BACEN (2018), o que torna o empreendimento atraente do ponto de vista econômico. Contudo, eventual deterioração do cenário econômico que leve a cotação do dólar acima do patamar referido anteriormente pode tornar o mesmo pouco atrativo, ainda que seja um cenário pouco provável. A Figura 7 apresenta uma variação do dólar entre R\$ 2.80 a R\$ 5.80, onde se obtiveram os seguintes valores de VPL:

Figura 7. VPL e variação da cotação do Dólar



Fonte: Autores

5. CONCLUSÕES

A produção do CH₄ acumulada a partir do landGEM foi de 515,400,000 m³. Para o biogás produzido entre os anos de 2018 e 2038, o valor foi de 934,872,000 m³, correspondendo à vida útil do aterro. Considerando os cenários avaliados no WARM, o cenário C3 apresentou maior vantagem pela redução do consumo energético e pela redução de emissões de GEE. É importante destacar ainda que os tratamentos térmicos como incineração exigem uma menor área e reduz significativamente o volume de RSU, acrescentando mais vantagens se comparado ao envio destes resíduos a um aterro sanitário. Portanto, os tratamentos térmicos podem ser uma interessante proposta para novos projetos que visam o planejamento de uma adequada gestão de RSU.

A viabilidade econômica do empreendimento é atingida, considerando uma ampla faixa de cotações do dólar, passando a se inviabilizar em uma situação de cotação acima de R\$ 5.058, o que não é previsto para o cenário internacional.

Desta forma, o investimento é justificado não apenas pela viabilidade econômica, mas soma-se o fato não menos importante da utilização da geração alternativa de energia, aproveitando o gás CH₄ produzido e gerando energia elétrica, possibilitando redução da demanda de energia, redução do uso de combustíveis fósseis e conseqüentemente redução de poluentes na atmosfera.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), e a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) por possibilitar a pesquisa e pelo suporte para o desenvolvimento tecnológico, científico e pessoal dos autores.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10004:2004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro.

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. (2016). *Tarifas de Energia. 2016*. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2018). *Panorama de resíduos sólidos no Brasil - 2017*. 2018. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/>>. Acesso em: nov. 2018.

Alcântara, P. B. (2007). *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese de Doutorado. Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE.

Alves, I. R. F. S. (2008). *Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE.

Barros, R. (2012). *Tratado Sobre Resíduos Sólidos: Gestão, Uso e Sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Interciência, p. 374.

BEN – Balanço Energético Nacional. (2017). *Balanço Energético Nacional (doc)*. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Ano base, 2016. Brasília.

Bidone, F. R. A., Povinelli, J. (1999). *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. São Carlos: EESC/USP, p. 120.

Bove, R., Lungh, P. (2006). Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies, *Energy Conversion and Management*, 47, 1391-1401.

Brasil. Constituição (2010). *Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010*. Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Cassini, S. T. et al. (2003). *Hidrólise e atividade anaeróbica em lodos*. In: Cassini, S. T. (Coord). Digestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB.

EPA – United States of Environmental Protection Agency. (2018). *Basic Information about the Waste Reduction Model (WARM)*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/warm/basic-information-about-waste-reduction-model-warm>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

Freitas, F. F., Souza, S. S., Ferreira, L. R. A., Otto, R. B. Alessio, F. J., Souza, S. N. M., Venturini, O. J., Ando Junior, O. H. (2019). The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 146-157.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). *Pesquisa nacional de saneamento básico 2008*. Rio de Janeiro: IBGE. p. 219.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2012). *Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos*. Relatório de Pesquisa. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República.

Jucá, J. F. T. (2003). *Disposição final dos resíduos urbanos no Brasil*. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. REGEO 2003. Porto Alegre, RS.

Liu, Yili et al. (2017). Greenhouse gas emissions from municipal solid waste with a high organic fraction under different management scenarios, *Journal of Cleaner Production*, 147, 451-457.

Mathias, M. C. P. P., Mathias, J. F. C. M. (2015). Biogas in Brazil: A Governmental Agenda, *Journal of Energy and Power Engineering*, 9, 1-15.

Meneguim, F. (2012). O que é o Mercado de carbon e como ele funciona. Disponível em: <<http://www.brasil-economia-governo.org.br/wp-content/uploads/2012/08/o-que-e-o-mercado-de-carbono-e-como-ele-opera-no-brasil.pdf>>. Acesso em: março de 2019.

Miguez, J. M. O. (2000). Brasil e o Protocolo de Quioto. *Cenbio Notícias*, 3(8), 3.

Rodrigues, W., Melo, J. A. (2017). Economic evaluation of low carbon farming technologies in brazilian savannas, *Informe IGEPEC*, 21 (1), 82-100.

Santos, I. F. S., Vieira, N. D. B., Nóbrega, L. G. B., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L. (2018). Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement, *Resources, Conservation & Recycling*, 131, 54-63.

Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Social E Turismo. (2017). *Prefeitura de Campinas. Guia de Investimentos 2017*. Disponível em: <http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/desenvolvimento-economico/guia_investimentos_pt.pdf>. Acesso em: out. 2018.

SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática. (2010). *Censo Demográfico, Séries Temporais. 2010*. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/136>>. Acesso em: set. 2018.

Silva, T. R. (2012). *Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG.

Silva, T. R., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., Santos, I. F. S. (2017). Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill, *Waste Management*, 65, 75-91.

Sistema Nacional DE Informação Sobre Saneamento. (2018a). *Diagnóstico Resíduos Sólidos*. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>>. Acesso em: 16 set. 2018.

SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. (2018b). *Coleta de dados do SNIS. Resíduos Sólidos. Ministério das Cidades*. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/coleta-de-dados-snis-residuos-solidos>>. Acesso em: nov. 2018.

Qasim, S. R. (1985). *Waste water treatment plants: planning, design and operation*. New York: Holt, Rinehart and Wiston, 1985.

Ustohalova, V., Ricken, T., Widmann, R. (2005). Estimation of landfill emission lifespan using process oriented modeling, *Waste Management*, 26, 442-450.

Villas Bôas, D. M. F. (1990). *Estudo da microbiota anaeróbia hidrolítica-fermentativa em aterro sanitário*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos. São Carlos–SP.

Von Sperling, M. (2005). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2a ed. revisada, 1, 60.

Yildiz, S., Yaman, C., Demir, G., Ozcan, H. K., Coban, A., Okten, H. E., Sezer, K., Goren, S. (2013). Characterization of Municipal Solid Waste in Istanbul, Turkey, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32 (3), 734-739.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Lílian Carla Ferreira Freitas – 25%

York Castillo Santiago – 20%

Natália de Souza Ribeiro – 18%

Taís Eliane Marques – 17%

Jucimar Augusto Pinto – 8%

Diego Ignacio Nieto Mogollón – 7%

Alex Takeo Yasumura Lima Silva – 5%