

Artigo Técnico

Avaliação dos parâmetros cinéticos da geração de metano em uma célula experimental de resíduos sólidos

Evaluation of kinetic parameters for methane generation in a solid waste test cell

Giovano Candiani^{1*}, João Manoel Losada Moreira²

RESUMO

O presente trabalho avalia os parâmetros cinéticos de modelos de primeira ordem (exponenciais) para geração de metano em aterros sanitários na região subtropical de São Paulo (SP). Construiu-se uma célula experimental especialmente para esse objetivo. A função resposta temporal da célula para geração de metano devido a uma deposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) foi obtida ao longo de 600 dias. O tempo necessário para iniciar a geração de metano foi de 190 dias. Entre o 400^o e o 500^o dia após a deposição dos resíduos houve uma fase de elevada taxa de geração de metano e, após o 560^o dia, esta começou a diminuir de forma relevante. Os parâmetros cinéticos potencial de geração de metano (L) e constante de biodegradação para geração de metano (k) foram inferidos por meio de ajustes do modelo de primeira ordem à função resposta obtida experimentalmente e utilizando informações de composição dos RSU. Os valores obtidos para L e k para biodegradação rápida (nos primeiros 3 anos) foram, respectivamente, 1,481±1,072 mol t⁻¹ RSU e 0,18±0,13 ano⁻¹. Os valores obtidos para L e k considerando biodegradação rápida e lenta (até dezenas de anos) foram 3,835 mol t⁻¹ RSU e 0,069±0,002 ano⁻¹ e 5,027 mol t⁻¹ RSU e 0,052±0,002 ano⁻¹, respectivamente, dependendo da metodologia utilizada para a determinação de L. Os resultados obtidos na célula experimental indicam que a biodegradação dos RSU em Caieiras (SP) ocorre rapidamente, isto é, com valores maiores para k e menores para L do que aqueles sugeridos na literatura. Esses resultados indicam possível redução da longevidade dos projetos de aproveitamento energético do metano em aterros sanitários em regiões tropicais e subtropicais. Ao final são feitas recomendações para a escolha de L e k para dimensionamento de projetos de aproveitamento energético e para avaliações e remediações ambientais.

Palavras-chave: resíduos sólidos; aterro sanitário; metano; célula experimental; parâmetros cinéticos.

ABSTRACT

This work evaluates the kinetic parameters of first order (exponential) models for methane generation in sanitary landfills in the subtropical region of São Paulo, SP. Specially for this purpose, a test cell was built. The temporal response function for the test cell's methane generation was obtained over 600 days due to placement of municipal solid waste (MSW). The time required to start the methane generation was 190 days. Between the 400th and 500th day after the MSW placement there was a period of high methane generation rate, and after the 560th day it began to decrease. The kinetic parameters methane generation potential (L) and biodegradation constant for methane generation (k) were inferred through fittings of the first order model to the experimental response function and using MSW composition information. The values obtained for L and k for fast biodegradation were respectively 1,481±1,072 mol t⁻¹ MSW and 0,18±0,13 year⁻¹. The values obtained for L and k considering fast and slow biodegradation were 3,835 mol t⁻¹ MSW and 0,069±0,002 year⁻¹ and 5,027 mol t⁻¹ RSU and 0,052±0,002 year⁻¹, respectively, depending on the methodology used for determining L. The results obtained in the test cell indicate that the biodegradation of municipal solid waste in Caieiras occurs rapidly, i.e., with higher values for k and lower values for L than those suggested in the literature. These results indicate a possible reduction in the longevity of energy generation projects through methane recovery in landfills located in tropical and subtropical regions. Finally, we present recommendations for choosing L and k for sizing energy recovery projects and for undertaking environmental assessments and remediation.

Keywords: municipal solid waste; methane generation; sanitary landfills; test cell; kinetic parameters.

INTRODUÇÃO

A Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos — PNRS (BRASIL, 2010), dispendo

sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de tais resíduos, incluindo o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final. Nesse contexto, a valorização

¹Professor na área de gestão ambiental da Universidade Federal de São Paulo - Diadema (SP), Brasil.

²Professor titular em Energia na Universidade Federal do ABC - Santo André (SP), Brasil.

*Autor correspondente: giovanocandiani@gmail.com

Recebido: 14/04/2016 - Aceito: 03/03/2017 - Reg. ABES: 162393

ambiental e energética de gases em aterros sanitários depende de uma boa estimativa da geração de gás metano. Destaca-se a importância do monitoramento para melhor compreensão dos parâmetros envolvidos nos mecanismos de biodegradação de resíduos sólidos e na geração de gás em aterro sanitário (BARROS, 2012; ABREU, 2014; CANDIANI & MOREIRA, 2015).

Estima-se que o Brasil produziu em 2015 aproximadamente 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo 60% dispostos em aterros sanitários e 40% em aterros controlados e lixões, que não são formas adequadas de disposição final e causam impactos ambientais como a poluição do solo, dos recursos hídricos e do ar (ABRELPE, 2016).

No Brasil, nota-se nos últimos anos uma maior tendência para fazer o aproveitamento energético do gás metano nos aterros sanitários, principalmente pela queima em motores de combustão interna (BARROS, 2013; BARROS; TIAGO FILHO; SILVA, 2014; LEME *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2014; NADALETTI *et al.*, 2015). De acordo com a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), o Brasil tinha, em 2012, uma capacidade instalada de 254 MW, considerando os aterros sanitários com projetos de geração de energia elétrica. Recentemente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016) divulgou dados menores, que mostram uma capacidade instalada pelos aterros sanitários brasileiros de aproximadamente 188 MW, destacando os de Caieiras (29,55 MW) e São João (24,64 MW), no estado de São Paulo, o de Salvador (BA) (15,16 MW) e mais 19 empreendimentos de menor porte espalhados pelo Brasil.

O dimensionamento de projetos de aproveitamento do metano em aterros sanitários para a geração de eletricidade baseia-se normalmente em modelos cinéticos de primeira ordem exponencial (SPOKAS *et al.*, 2006; MACHADO *et al.*, 2009; MACIEL & JUCÁ, 2011; ABREU, 2014; MOREIRA; SILVA; CANDIANI, 2015; WANGYAO *et al.*, 2010). Normalmente, estes modelos dividem os resíduos sólidos urbanos (RSU) em várias categorias, cada uma com seu respectivo potencial de geração de metano (L) a partir da biodegradação de RSU e constante de biodegradação (k) (MACHADO *et al.*, 2009; MOU; SCHEUTZ; KJELDSSEN, 2015; FEI; ZEKKOS; RASKIN, 2016). Os modelos mais utilizados são *Scholl Canyon*, do Banco Mundial, *LandGEM*, da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, e o método de primeira ordem do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (BANCO MUNDIAL, 2003; USEPA, 2005; IPCC, 2006; MACHADO *et al.*, 2009; MACIEL & JUCÁ, 2011; SCHEUTZ *et al.*, 2011; ABREU, 2014; MOREIRA & CANDIANI, 2016).

O valor desses parâmetros depende de vários fatores, como teor de umidade, teor de resíduos orgânicos, temperatura do ambiente e condições climáticas locais, e tem impacto na economicidade dos projetos de aproveitamento de energia a partir do metano oriundo de aterros sanitários. Os aterros localizados em regiões tropicais apresentam biodegradação mais rápida do que aqueles situados em regiões

temperadas e frias (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993; SPOKAS *et al.*, 2006; MACHADO *et al.*, 2009; MOREIRA; SILVA; CANDIANI, 2015). Se o dimensionamento do projeto for realizado de maneira inadequada, como, por exemplo, superestimando a produção de metano ao longo do tempo e, conseqüentemente, a geração de créditos de carbono, podem ocorrer frustração de receitas e prejuízos. Este tipo de experiência foi observado em aterros sanitários de grande porte na cidade de São Paulo (CANDIANI; MOREIRA, 2015).

O objetivo deste trabalho foi avaliar experimentalmente um conjunto de parâmetros cinéticos de primeira ordem adequado para a estimativa de geração de metano a partir de aterros sanitários na região de São Paulo (SP), Brasil. Para tal, foi construída uma célula experimental no Aterro Sanitário de Caieiras (SP) para determinar a função resposta temporal de um aterro que receba RSU na região de São Paulo. Foram realizadas diversas medidas ao longo de 600 dias. Mediu-se a vazão de metano ao longo do tempo, no dreno vertical central da célula experimental, tomando-a como proporcional à taxa de geração de metano na célula. Para determinar a taxa de geração de metano absoluta ao longo do tempo, realizou-se um balanço de metano levando em consideração a taxa de emissão através da cobertura da célula para a atmosfera e a vazão no dreno central. O resíduo sólido utilizado na célula foi caracterizado e os parâmetros cinéticos foram estimados a partir de um ajuste do modelo de primeira ordem exponencial à função resposta da célula obtida experimentalmente.

Este artigo se inicia com a metodologia utilizada para desenvolver o trabalho. A seguir, apresentam-se os resultados, as discussões sobre os resultados e uma discussão sobre um conjunto de parâmetros cinéticos de geração de metano apropriado para projetos de aproveitamento energético. Finalmente, são apresentadas as conclusões.

METODOLOGIA

Modelo de geração de metano de primeira ordem (exponencial)

A biodegradação de RSU depositados em aterros sanitários para a geração de metano pode ser estimada de várias formas, sendo a mais comum aquela baseada em um modelo de primeira ordem exponencial (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). Esse modelo se baseia em dois parâmetros principais: k , ou probabilidade de biodegradação por unidade de tempo, k (ano^{-1}), e L , ou quantidade de metano gerada por tonelada de RSU, L ($\text{mol CH}_4 \text{ t}^{-1} \text{ RSU}^{-1}$). O parâmetro k pode ser mais bem entendido tomando-se o seu inverso, que fornece uma medida do tempo (em anos) necessário para que 37% dos resíduos presentes sejam biodegradados, produzindo metano. L e k devem ser obtidos levando em consideração a característica do resíduo sólido, a umidade, a fração de material orgânico e as condições climáticas da

região (SPOKAS *et al.*, 2006; MACHADO *et al.*, 2009; MACIEL & JUCÁ, 2011; ABREU, 2014; MOREIRA; SILVA; CANDIANI, 2015).

Neste modelo, a taxa de geração de metano ao longo do tempo (t), devido à deposição de 1 tonelada de RSU na data (t'), é dada pela Equação 1 (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993; FAOUR; REINHART; YOU, 2006; IPCC, 2006; USEPA, 2005):

$$T(t', t) = Lke^{-k(t-t'+\tau)} \quad (1)$$

Em que:

L e k foram definidos anteriormente;

τ = o tempo de latência entre o momento da deposição do resíduo no aterro e o efetivo início do processo de geração de metano, que leva algum tempo (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993; USEPA, 2005).

O valor τ depende do tipo de modelo que é desenvolvido, e em muitas aplicações ele é desprezado. Por exemplo, ele pode representar o momento em que a geração de metano tem início ou se torna relevante ou máxima. O valor τ , em um modelo de primeira ordem exponencial de biodegradação (Equação 1), é definido quando a taxa de geração de metano é máxima (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993; FAOUR; REINHART; YOU, 2006; IPCC, 2006; USEPA, 2005).

A unidade de $T(t', t)$ adotada neste trabalho é moles de metano gerado por unidade de massa de resíduos depositados na data t' (1 tonelada de RSU) e por unidade de tempo (ano^{-1}). $T(t', t)$ pode ser chamada de função resposta do aterro sanitário quanto à produção de metano, já que fornece a taxa de geração ao longo do tempo causada por uma deposição unitária de RSU.

A taxa da geração de metano no aterro sanitário pode ser obtida fazendo a integral de convolução da Equação 1 (HILDEBRAND, 1992; CANDIANI, 2011; CANDIANI & MOREIRA, 2015), gerando a Equação 2:

$$R(t) = \int_0^t R_M(t')T(t', t)dt' \quad (2)$$

Em que:

$R(t)$ = a taxa de geração de metano por unidade de tempo no aterro sanitário (mol ano^{-1});

$R_M(t')$ = a taxa de deposição de RSU no aterro por unidade de tempo (t RSU ano^{-1}).

Notar que, na data t' , a massa depositada é dada por $R_M(t') dt'$.

Base teórica para a medida da função resposta da célula experimental

Neste trabalho, partiu-se primeiro para a obtenção da função resposta de geração de metano no Aterro Sanitário de Caieiras. Construiu-se

um sistema, denominado de célula experimental, no qual buscou-se simular uma deposição de RSU de massa conhecida M_0 na forma de pulso em uma data $t'=0$, isto é, conforme Equação 3:

$$R_M(t) = M_0\delta(t) \quad (3)$$

Em que:

$\delta(t')$ = a função delta de Dirac (HILDEBRAND, 1992; CANDIANI & MOREIRA, 2015).

A deposição dos RSU na célula experimental (M_0) pode ser considerada como uma entrada neste sistema na forma de pulso (toda a massa depositada de uma só vez) e a saída, a taxa de geração de metano, $R(t)$. Utilizando as Equações 2 e 3, pode-se determinar $R(t)$ para a célula experimental devido a esta deposição, isto é, conforme a Equação 4:

$$R(t) = \int_0^t M_0\delta(t')T(t', t)dt' = M_0T(0, t) \quad (4)$$

Consequentemente, com esta entrada de RSU na célula experimental, a função resposta do sistema pode ser obtida por meio da Equação 5:

$$T(0, t) = \frac{R(t)}{M_0} \quad (5)$$

O comportamento temporal de $R(t)$ é normalmente obtido de forma indireta em aterros por meio da medida temporal da vazão de um dreno de características conhecidas. O valor absoluto de $R(t)$ é dado pela eficiência do dreno, que relaciona sua vazão com a taxa de geração de metano, $R(t)$. Neste trabalho, a eficiência do dreno foi obtida por meio do balanço de metano em uma região de aterro (BOGNER & SPOKAS, 1995). Para realizar um balanço com maior precisão, foi construída uma célula experimental. Se $R(t)$ puder ser medida experimentalmente e M_0 for conhecida, é possível obter experimentalmente $T(0, t)$. Utilizando a Equação 1, é possível determinar os parâmetros cinéticos por meio do ajuste daquela equação ao resultado experimental de $T(0, t)$.

A seguir, descrevem-se a célula experimental, o procedimento utilizado para a obtenção da eficiência do dreno e a vazão de metano do dreno ao longo do tempo.

Célula experimental

O estudo foi realizado no Aterro Sanitário de Caieiras, localizado no município de Caieiras (23°21'51"S e 46°44'26" W), no estado de São Paulo, Brasil. O município se situa na Região Metropolitana de São Paulo e apresenta clima subtropical, área de 95,89 km^2 e população de 86.623 habitantes. Está inserido em uma região de clima do tipo Cwa, temperado úmido com verões chuvosos e invernos secos, conforme a classificação de Köppen. A precipitação média anual é de

1.450 mm e a temperatura média do ar durante o ano, de 18°C, com mínima média de 13,5°C e máxima média de 22°C, sendo que o relevo acentuado influencia fortemente o clima local. A região se encontra no Planalto Atlântico, mais precisamente na Zona Serrania de São Roque, o solo é siltoso e as altitudes variam entre 1.100 m (topos e encostas) e 750 m nos fundos de vale. O aterro teve a operação iniciada em 2002 e, atualmente, recebe aproximadamente 7.000 toneladas/dia de RSU, provenientes principalmente do município de São Paulo (ESSENCIS, 2016).

O projeto da célula experimental previu um único dreno central para escape de biogás e uma cobertura espessa de terra com superfície externa regular para minimizar a fuga de gás e, adicionalmente, facilitar a medida do fluxo de metano que possa escapar através dela para a

atmosfera. Com este projeto, buscou-se facilitar as medidas temporais de vazão no dreno e também a realização de um balanço de metano em toda a célula experimental. Adicionalmente, houve um cuidado especial para que a deposição de resíduos ocorresse rapidamente a fim de simular as condições estabelecidas na Equação 3.

Ela foi construída segundo os critérios técnicos de implantação das etapas do Aterro Sanitário de Caieiras e instalada em uma área inativa do aterro, apresentando as seguintes dimensões: 30 m de largura, 35 m de comprimento e 5 m de altura. Foi instalado um dique de contenção de 1,5 m ao redor da célula, com função estrutural e também para facilitar a disposição dos RSU, o que ocorreu em 12 dias. No centro da célula experimental foi implantado o dreno vertical para captar o biogás (Figura 1).

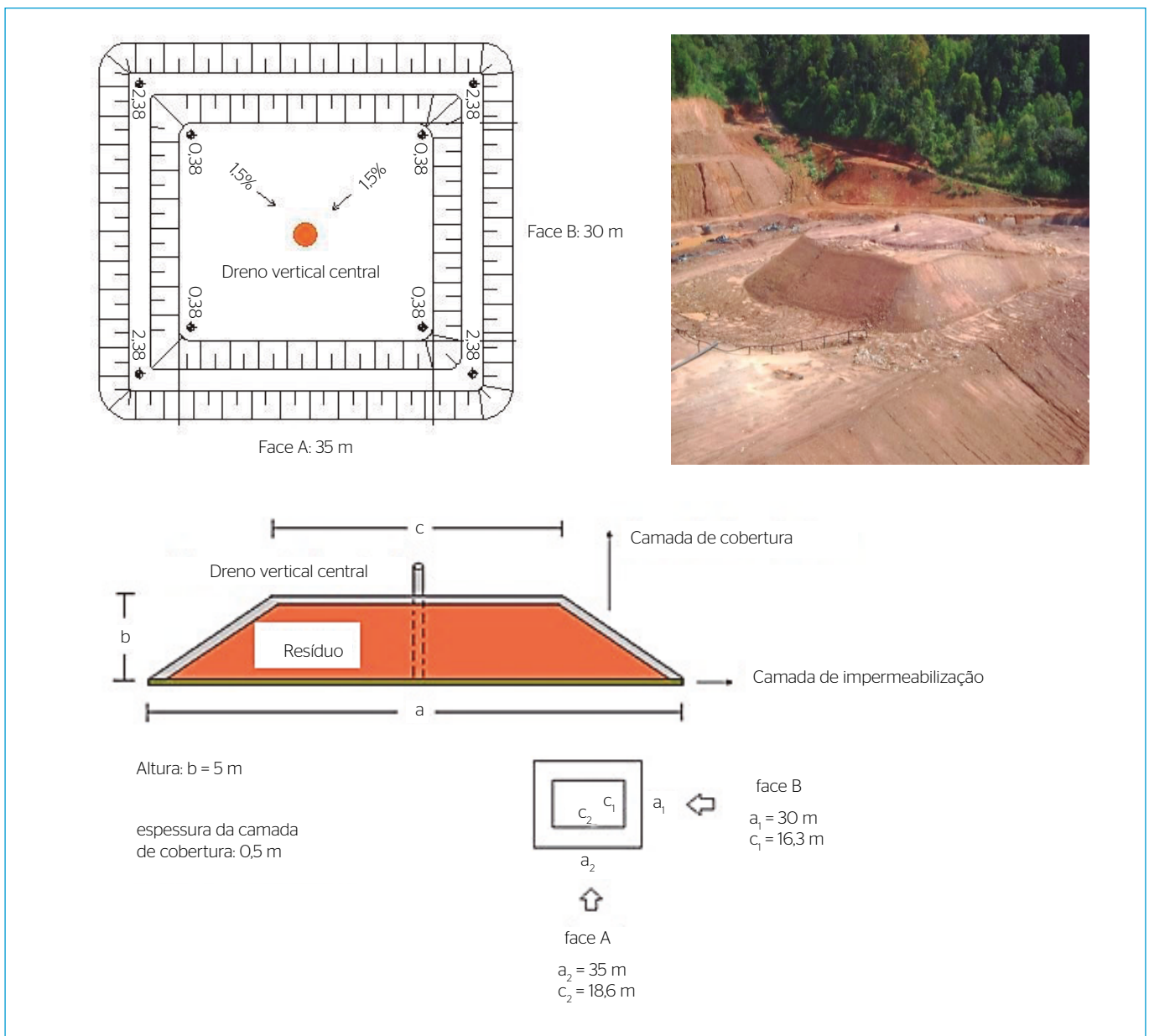


Figura 1 - Vistas superior e lateral da célula experimental e dados dimensionais.

A célula experimental apresenta a estrutura construtiva mostrada na Figura 2. No sentido base–topo tem-se camada de solo (siltoso) compactada com espessura de 1 m, geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) com 2 mm de espessura, geotêxtil manta bidim RT-31 (600 g), camada (0,5 m) de brita número 5, camada de resíduos sólidos com 4,5 m e camada de solo argiloso de cobertura final de 0,5 m.

Nestas condições, a vazão de metano no dreno central, $Q(t)$, é proporcional à taxa de geração de metano pela célula experimental, conforme Equação 6:

$$Q(t) = \varepsilon R(t) \quad (6)$$

Em que:

ε = a eficiência do dreno vertical obtida como a razão entre a vazão de metano do dreno vertical central e a taxa de geração de metano na célula experimental.

A eficiência do dreno foi obtida experimentalmente por meio de medidas de balanço de metano na célula experimental, contabilizando fugas para o dreno e através da superfície externa da célula.

Balanço de metano na célula experimental para determinação da eficiência do dreno

Os principais eventos que ocorrem em um aterro sanitário quanto ao aparecimento e desaparecimento de metano são a geração via processo de biodegradação, a fuga do aterro por meio de drenos, a fuga através da interface entre a cobertura do aterro e a atmosfera e a remoção de metano por meio de oxidação via microrganismos metanotróficos (BOGNER & SPOKAS, 1995; SPOKAS *et al.*, 2006; CHRISTOPHERSEN *et al.*, 2011; MOREIRA & CANDIANI, 2016). Em uma situação de

equilíbrio, a taxa de geração de metano no aterro é igual à taxa de remoção por meio da fuga e da oxidação. Nesta condição de equilíbrio, e desprezando a oxidação na cobertura da célula experimental, o balanço de metano é descrito pela Equação 7 (BOGNER & SPOKAS, 1995; SPOKAS *et al.* 2006; CHRISTOPHERSEN *et al.*, 2011):

$$F + Q = R \quad (7)$$

Em que:

F = a taxa de emissão total de metano através da interface célula experimental-atmosfera;

Q e R foram definidos anteriormente.

Portanto, considerando a Equação 6, a eficiência do dreno pode ser obtida da razão (Equação 8):

$$\varepsilon = \frac{Q}{F+Q} \quad (8)$$

A unidade métrica de cada termo na Equação 5 é dada por mol s^{-1} . F e Q foram obtidos por meio de medições na célula experimental em condição aproximada de equilíbrio. A taxa de oxidação de metano neste trabalho foi desprezada. De acordo com a literatura, a oxidação na cobertura de aterros sanitário apresenta valores médios de 15% do total produzido (BOGNER & SPOKAS, 1995; SPOKAS *et al.*, 2006; CHRISTOPHERSEN *et al.*, 2011; MOREIRA & CANDIANI, 2016).

Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos

Os RSU utilizados para o preenchimento da célula experimental foram aqueles normalmente depositados no Aterro Sanitário de Caieiras. Para facilitar a operação de disposição de resíduos na célula experimental,

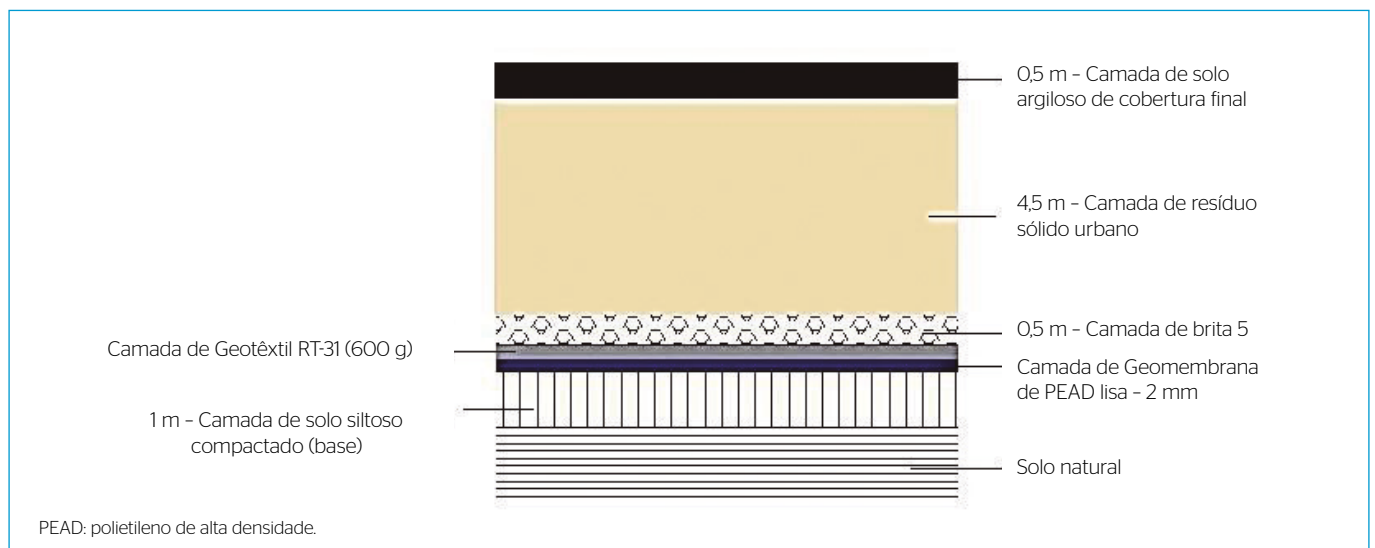


Figura 2 - Perfil construtivo da célula experimental.

foram utilizados somente caminhões compactadores oriundos das seguintes rotas da coleta domiciliar no município de São Paulo: bairros de Perus, Pirituba e Jaraguá, localizados próximo ao município de Caieiras. Os caminhões foram pesados na balança do aterro e, em seguida, descarregaram os resíduos na célula experimental. Os RSU depositados na célula foram caracterizados por meio de uma amostragem utilizando o método de quarteamento gravimétrico, conforme Viana, Silveira e Martinho (2015). Foram definidas as seguintes categorias de resíduos para facilitar a caracterização: matéria orgânica (restos de alimentos e resíduos de jardinagem), têxteis, couros e madeira, papel/papelão, plásticos, vidros, metais e outros, incluindo solo/entulho, pilhas/baterias, fraldas, borracha e resíduos de sanitários (BARROS, 2012).

Medidas de Q e F na célula experimental

A vazão de metano, Q, no dreno da célula experimental foi obtida a partir da velocidade, v, do gás no dreno vertical central (medida por meio de um anemômetro de fio quente, modelo TAFR-180, marca INSTRUTHERM) e da fração molar de metano correspondente, f_{CH_4} (medido através de um analisador portátil de gás, modelo GEM™ 2.000, marca LANDTEC). Na parte superior do dreno vertical central foi realizada uma adaptação através da instalação de um sistema de tubos e, desta maneira, possibilitou-se a conexão das sondas dos instrumentos de medição (Figura 3). Considerando-se o biogás produzido na célula experimental como um gás ideal, que ocupa todo o volume do dreno vertical central e apresenta uma velocidade média, a vazão de metano no dreno da célula é dada pela Equação 9 (CANDIANI & MOREIRA, 2015):

$$Q(t) = \frac{V(t) f_{CH_4} T_0}{a T} A_w (\text{mols}^{-1}) \quad (9)$$

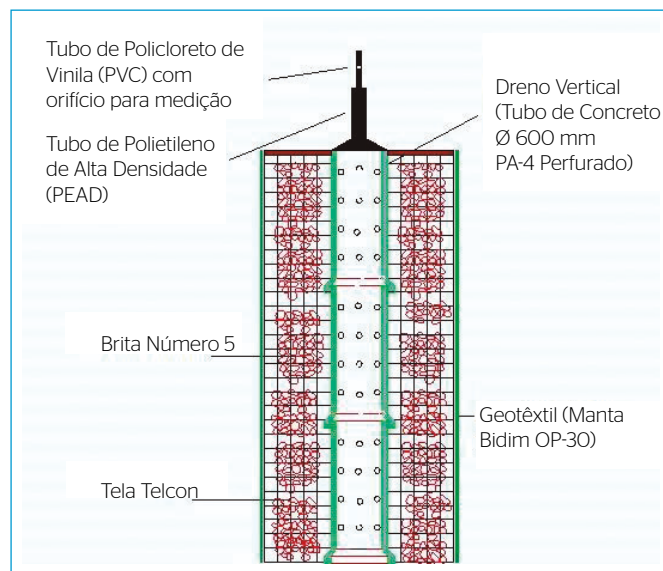


Figura 3 - Adaptação no dreno vertical da célula experimental para realizar as medições de vazão de metano.

Em que:

$v(t)$ = a velocidade do gás medida ao longo de 600 dias;

f_{CH_4} = a fração molar de metano no gás;

$a = 0,0224 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$;

T = a temperatura do gás durante a medição;

$T_0 = 273,15 \text{ K}$;

A_w = a área da seção transversal do dreno vertical central ($0,2835 \text{ m}^2$).

As variáveis necessárias para medir adequadamente a vazão de metano no dreno da célula experimental são: velocidade, temperatura e composição do gás. Os dados de pressão (91.054 Pa) e temperatura (entre 273 e 323 K) do ambiente foram obtidos da estação meteorológica de Caieiras (CANDIANI & MOREIRA, 2015).

O fluxo de metano foi medido em 55 posições na superfície da célula experimental (CANDIANI & MOREIRA, 2015; MOREIRA & CANDIANI, 2016). As medidas foram realizadas em torno do 450º dia após a deposição de resíduos na célula. Esses resultados, integrados na superfície externa da célula, fornecem a taxa de emissão total de metano na interface cobertura da célula e atmosfera (F). O valor obtido foi $F=0,0100 \pm 0,0064 \text{ mol s}^{-1}$ (CANDIANI & MOREIRA, 2015; MOREIRA & CANDIANI, 2016).

Modelos matemáticos utilizados para obtenção dos parâmetros cinéticos L e k

Os modelos matemáticos utilizados foram ajustados em função da resposta observada (taxa de geração de metano) na célula experimental, por meio do programa computacional de análise de dados MATLAB (MATrix LABoratory). Utilizou-se uma função de ajuste de curva não linear. A função a ser ajustada, semelhante à Equação 1, é obtida conforme Equação 10:

$$T(t', t) = p_1 e^{-p_2(t' - (t' + \tau))} \quad (10)$$

Em que:

p_1 e p_2 = parâmetros a serem ajustados aos dados experimentais;

τ deve ser inferida a partir do monitoramento da vazão de metano no dreno central, Q(t). Observa-se que, nesse caso, $p_2 = k$ (constante de biodegradação) e $p_1 = L k$ (produto entre L e k).

O tempo de monitoramento da geração de metano neste trabalho foi de 600 dias. Dessa forma, os resultados a serem obtidos devem representar a biodegradação rápida que ocorre nos aterros sanitários. O valor de L deve ser menor devido apenas ao gás de materiais que se degradam rapidamente, e k para geração de metano deve ser maior, pois somente a biodegradação rápida está sendo observada.

Para contornar essa limitação, neste trabalho foram considerados dois valores previamente calculados do L e determinou-se,

por meio do ajuste, somente k . Os valores de L foram obtidos pelo método do IPCC (2006) e pelo método simplificado proposto por Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) e outros autores (MACHADO *et al.*, 2009). O método do IPCC (2006) é bastante genérico e inclui pouca informação do resíduo em estudo. O segundo método leva em consideração os materiais utilizados e vários parâmetros, conforme descritos em Candiani e Moreira (2015). Os valores de L obtidos por essas metodologias incluem os processos de biodegradação rápida ou lenta. O valor obtido com a metodologia de Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) é de $3.835 \text{ mol t}^{-1} \text{ RSU}$ e o obtido com a do IPCC (2006), $5.026,8 \text{ mol t}^{-1} \text{ RSU}$.

Esses valores também serão utilizados para a obtenção do parâmetro cinético k . Neste caso, busca-se determinar somente um parâmetro, e a equação de ajuste é a Equação 11:

$$T(t', t) = Lp_2 e^{-p_2(t-(t'+\tau))} \quad (11)$$

Em que:

$$p_2 = k.$$

RESULTADOS

Massa total de resíduos sólidos, tempo de deposição e composição desses resíduos na célula experimental

A construção da célula experimental levou aproximadamente duas semanas, sendo preenchida com uma massa de $3.786,13 \pm 0,25$ toneladas de RSU (M_0) em um período de 12 dias. A balança utilizada tinha incerteza de 10 kg e o período de deposição provoca incertezas temporais de ± 6 dias nas observações realizadas.

A umidade dos RSU depositados na célula experimental foi de 60,9%. O Quadro 1 mostra a composição gravimétrica dos resíduos, destacando-se a presença significativa (58,3%) da matéria orgânica. O tempo de observação do processo de biodegradação dos RSU foi de 600 dias.

Quadro 1 – Composição dos resíduos depositados na célula experimental.

Composição de RSU	Porcentagem (%)
Matéria orgânica	58,3
Plásticos	15,2
Papel e papelão	14,6
Vidros	2,5
Metais	1,8
Tecidos, couros e madeira	3,7
Outros	3,9
Total	100

RSU: resíduos sólidos urbanos.

Medidas de vazão de metano no dreno central ao longo do tempo e inferência do tempo de latência

A Figura 4 apresenta o comportamento da vazão de metano no dreno central da célula experimental em função do tempo. A data de deposição dos resíduos é indicada como dia 0. Para determinar a vazão de metano foram medidas a vazão de biogás e a composição do biogás no dreno central. É possível notar uma fase de latência (atraso) em relação à produção de metano em torno de seis meses, pois este não é produzido imediatamente. A seguir, ocorre um período de crescimento significativo até em torno do 11º mês. Observando a Figura 5, tomou-se o início do processo de geração de metano em 0,52 ano e o final da fase de crescimento em 0,93 ano.

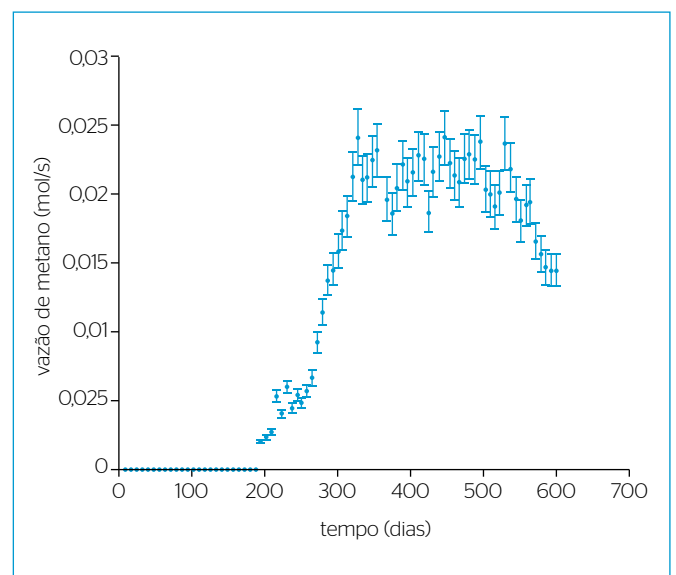


Figura 4 – Vazão de metano em função do tempo na célula experimental.

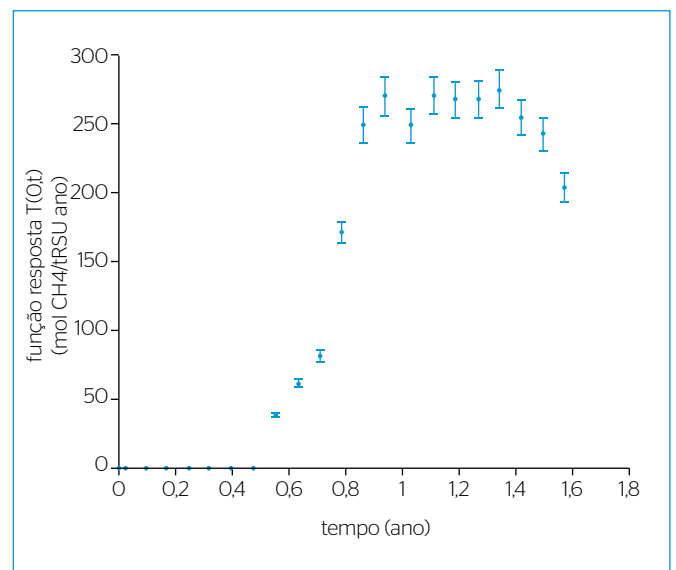


Figura 5 – Função resposta para geração de metano na célula experimental.

Após este período, a produção de metano na célula experimental atinge valores mais ou menos constantes entre 400 e 500 dias após a deposição de resíduos. A partir de 600 dias, fica visível a diminuição da vazão de metano no dreno central da célula.

Para o período mais estável, entre os dias 400 e 500, foram obtidos valores médios de várias medidas: a composição média (fração molar) do gás no dreno da célula experimental foi de $52,7 \pm 1,6\%$ de CH_4 , $39,0 \pm 1,1\%$ de CO_2 e $0,27 \pm 0,05\%$ de O_2 . A velocidade média do gás foi de $2,15 \pm 0,10 \text{ m s}^{-1}$ e a temperatura média, de 34°C . A vazão média de metano no dreno (Q) foi de $0,0225 \pm 0,0010 \text{ mol s}^{-1}$.

A partir das observações feitas, o tempo de latência para o modelo de primeira ordem exponencial (quando a taxa de produção de metano é relevante ou máxima) foi tomado como $\tau=0,93$ ano.

Balço de metano e determinação da eficiência do dreno (ϵ)

A taxa de geração de metano foi calculada utilizando a Equação 7, e a eficiência do dreno vertical central foi obtida pela Equação 8. A equação de balanço de metano é válida em situação de equilíbrio. Observa-se que, entre os dias 400 e 500, a vazão de metano no dreno vertical foi bastante estável (Figura 4), apresentando um valor médio $Q=0,0225 \pm 0,0010 \text{ mol s}^{-1}$ (desvio padrão de 4,4%). O Quadro 2 reproduz os valores obtidos para Q e F e apresenta os resultados para a taxa de geração de metano total na célula experimental e a eficiência do dreno central.

Obtenção experimental da função resposta da célula para geração de metano

A eficiência do dreno central apresentada no Quadro 2 foi considerada válida para todo o período de 600 dias de estudo. Considerando os resultados de vazão do dreno central apresentados na Figura 4 e a Equação 5, pôde-se obter a função resposta para geração de metano na célula experimental (Figura 5).

Obtenção dos parâmetros cinéticos L e k por meio de ajustes à função resposta

L e k foram determinados para 3 modelos utilizando as Equações 10 e 11, ajustadas aos dados experimentais apresentados na Figura 5. O Modelo A baseia-se na Equação 10, na qual os parâmetros p_1 e p_2 são determinados. O Modelo B baseia-se na Equação 11, considerando

Quadro 2 - Resultados do balanço de metano entre os dias 400 e 500 na célula experimental.

Parâmetro	Valor
F, Taxa de emissão de metano através da interface célula-atmosfera (mol s^{-1})	$0,0100 \pm 0,0064$
Q, Vazão de metano no dreno vertical central (mol s^{-1})	$0,0225 \pm 0,0010$
R=F+Q, taxa de geração total de metano (mol s^{-1})	$0,0325 \pm 0,0065$
Eficiência do dreno central	$0,69 \pm 0,14$

L fornecido pelo método proposto por Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993), enquanto o Modelo C fundamenta-se na Equação 11, considerando L fornecido pelo método do IPCC (2006). O tempo de latência considerado foi $\tau=0,93$ ano.

O Quadro 3 apresenta os resultados obtidos para L e k nos 3 modelos, e a Figura 6 compara esses resultados com os dados experimentais.

DISCUSSÃO

Discussão sobre a célula experimental, a massa total de resíduos sólidos e o tempo de deposição

A célula experimental foi construída para estudar o processo de geração de metano no Aterro Sanitário de Caieiras. Sua construção considerou os processos de engenharia utilizados no aterro. A célula está localizada no

Quadro 3 - Resultados obtidos dos parâmetros ajustados para os modelos A, B e C. Os parênteses indicam o intervalo de incerteza com 95% de confiança.

Modelos matemáticos	Valores
Modelo A) Equação 10 (determinação de p_1 e p_2)	$p_1 = 273,4$ (247,3; 299,6) $p_2 = 0,1846$ (-0,0747; 0,4440) $L = 1481 \pm 1072 \text{ mol t}^{-1} \text{ RSU}$ $k = 0,18 \pm 0,13 \text{ ano}^{-1}$
Modelo B) Equação 11 (determinação de p_2 usando $L=3,835 \text{ mol t}^{-1} \text{ RSU}$), segundo Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993)	$p_2 = 0,069 \pm 0,002$ (0,06512; 0,07242) $k = 0,069 \pm 0,002 \text{ ano}^{-1}$
Modelo C) Equação 11 (determinação de p_2 usando $L=5,026,8 \text{ mol CH}_4 \text{ t}^{-1} \text{ RSU}$), segundo IPCC (2006)	$p_2 = 0,052 \pm 0,002$ (0,04937; 0,0549) $k = 0,052 \pm 0,002 \text{ ano}^{-1}$

L: potencial de geração de metano; k: constante de biodegradação para geração de metano; RSU: resíduos sólidos urbanos.

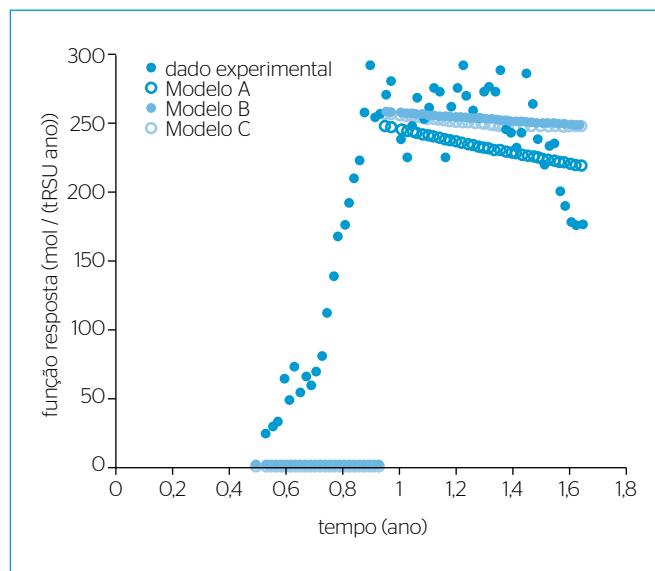


Figura 6 - Função resposta da geração de metano obtida na célula experimental e os vários modelos matemáticos considerados.

sítio do Aterro de Caieiras e, conseqüentemente, submetida às mesmas variações climáticas. Os RSU depositados na célula experimental foram retirados de caminhões coletores da cidade de São Paulo, de forma a representar o resíduo típico do aterro. A composição dos RSU (Quadro 1), com 58,3% de resíduos orgânicos, é similar à do material recebido no Aterro de Caieiras. Assim, pode-se afirmar que a célula experimental representa os processos de biodegradação que ocorrem no aterro.

Para obter a função resposta da célula quanto à geração de metano devido à deposição de RSU, é necessário fazer uma deposição de massa conhecida na forma de pulso conforme a Equação 3. A massa de RSU depositada foi medida com precisão. O tempo de deposição de resíduos (12 dias), embora não transcorrido em um único dia, é muito inferior ao tempo de observação e medidas na célula (2% de 600 dias) e ao lapso de tempo até o início da geração de metano (190 dias após o início da deposição). Observando a Figura 4, nota-se que a incerteza de ± 6 dias na data de deposição de resíduos não impede o estudo da evolução temporal do processo de geração de metano na célula experimental. Outras incertezas neste estudo são mais importantes.

Discussão sobre medidas de vazão no dreno central e inferência do tempo de latência

Os resultados de vazão de metano no dreno vertical central apresentados na Figura 4 permitiram observar com detalhe a cinética do processo de geração de metano na célula experimental. A fase de latência (sem produção de metano) durou 0,52 ano ou 190 dias e inclui as fases de hidrólise, aeróbia e anaeróbia ácida não metanogênica (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). A duração desta fase está de acordo com a literatura, que estima em torno de seis meses (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). Segundo Tchbanoglous, Theisen e Vinil (1993), entre o 190º e o 340º dia (0,93 ano) a célula deve ter estado na fase anaeróbia metanogênica não estabilizada (ainda com presença de oxigênio) e, após este período, até o 560º dia, na fase anaeróbia metanogênica estabilizada (sem presença de oxigênio). O valor de $0,27 \pm 0,05\%$ para a fração molar de O_2 na parte superior do dreno central comprova o estado anaeróbio no interior da célula. Os tempos apresentados para as diversas fases do processo de geração de metano estão de acordo com a literatura (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993).

O tempo de latência para o modelo de primeira ordem exponencial pôde ser bem determinado a partir da Figura 4. O período de geração de metano com estabilidade (entre o 400º e o 500º dia) permitiu a realização do balanço de metano para a obtenção da eficiência do dreno vertical central.

Discussão sobre o balanço de metano e a eficiência do dreno vertical central

As medidas realizadas no dreno vertical central permitem obter o comportamento temporal da taxa de geração de metano na célula,

mas não seu valor absoluto. Para tal é necessário determinar a eficiência do dreno fazendo-se um balanço de metano assumindo condições de equilíbrio. No período escolhido, entre os dias 400 e 500, o desvio padrão para o valor de Q foi de $\pm 4,4\%$, e não se observa na Figura 6 nenhuma tendência de aumento ou queda. Admitindo que tal desvio padrão seja suficientemente pequeno para assumir uma condição de equilíbrio, justifica-se usar a Equação 7 de balanço para determinar a taxa de geração de metano total na célula experimental neste período.

A eficiência do dreno de $0,69 \pm 0,14$ é bastante elevada e garante maior confiabilidade na proporcionalidade entre a taxa de geração de metano e a vazão do dreno central. Na região próxima ao dreno vertical central (cerca de 10 m ao seu redor), o fluxo de metano na superfície externa da célula era desprezível, indicando que o caminho preferencial dos gases no seu interior era o dreno.

Discussão sobre a função resposta $T(O,t)$ e os parâmetros cinéticos L e k

O experimento idealizado com deposição de RSU na forma de um pulso permitiu obter o comportamento temporal do processo de biodegradação para a geração de metano. A fase de estabilidade de vazão de metano no dreno central, observada durante o 400º e o 500º dia após a deposição de resíduos, permitiu realizar um balanço de metano e obter a eficiência do dreno.

O tempo de observação de apenas 600 dias permite avaliar somente os processos de biodegradação mais rápidos. Neste período, o comportamento não foi similar a um decaimento exponencial (Figuras 5 e 6). Este provavelmente será observado para tempos superiores a 600 dias, estendendo-se para alguns anos (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). Nota-se também que a função resposta cai significativamente entre o 500º e o 600º dia (de $\sim 270 \text{ mol t}^{-1} \text{ RSU ano}^{-1}$ para $\sim 170 \text{ mol t}^{-1} \text{ RSU ano}^{-1}$). Este resultado, se confirmado, explica a queda da taxa de geração de metano observada em vários aterros após o término da deposição de resíduos.

No Modelo A, o valor de $L = 1.481 \pm 1.072 \text{ mol t}^{-1} \text{ RSU}$ obtido via ajuste da Equação 11 à função resposta levantada experimentalmente é muito inferior àqueles apresentados por outras metodologias (IPCC, 2006; TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993; USEPA, 2005; BRITTO, 2006; MACHADO *et al.* 2009; MACIEL & JUCÁ, 2011; WANGYAO *et al.*, 2010). Por exemplo, Machado *et al.* (2009), em pesquisas realizadas para estimar o L no Aterro de Salvador (BA), obtiveram valores entre 2.900 e 3.125 $\text{mol t}^{-1} \text{ RSU}$, e Mor *et al.* 2006, em estudos para Nova Deli, valor de 2.019 $\text{mol t}^{-1} \text{ RSU}$. Ambos os resultados são inferiores aos sugeridos pelo IPCC e pela USEPA para regiões tropicais.

Uma primeira justificativa parece recair sobre o curto tempo de observação deste experimento (600 dias), no qual contabilizou-se apenas a biodegradação rápida. Assim, o valor de L é menor devido à contribuição somente dos materiais prontamente biodegradáveis.

Uma segunda justificativa está ligada às condições do material depositado e ao clima subtropical da região do Aterro de Caieiras. O valor de k é afetado por um grande número de fatores, porém os principais são o teor de materiais orgânicos nos RSU, o teor de umidade e as condições de aterramento. O valor k de $0,18 \pm 0,13 \text{ ano}^{-1}$ obtido pelo Modelo A, que corresponde a um tempo de meia-vida de 3,85 anos, está associado a temperaturas elevadas, alta umidade e grandes quantidades de resíduos orgânicos, condições típicas de aterros sanitários em regiões de clima tropical e subtropical. Machado *et al.* (2009) e Mor *et al.* (2006) sugerem valores para k entre 0,1 e $0,2 \text{ ano}^{-1}$. A célula experimental encontra-se em um local com tais condições ambientais, assim, no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2010, a temperatura média mensal foi de $21,4^\circ\text{C}$, a pluviosidade média anual, 1.679,5 mm e o teor de material orgânico, 58,3%, fatores que contribuíram para um rápido processo de biodegradação metanogênica.

Os modelos B e C fornecem resultados para k considerando valores de L previamente determinados a partir da caracterização dos resíduos depositados na célula experimental e duas metodologias diferentes. Os resultados de k obtidos por esses modelos são menores do que o fornecido pelo Modelo A. Isto se explica pelo fato de o valor de L ser maior. Assim, os valores de k obtidos foram de $0,052$ e $0,069 \text{ ano}^{-1}$, considerando o valor de L de Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) e IPCC (2006), respectivamente. Esses resultados estão mais próximos dos valores padrão sugeridos pelo IPCC e pela USEPA, que se encontram entre $0,05$ e $0,06 \text{ ano}^{-1}$ para aterros sanitários em países tropicais (IPCC, 2006; USEPA, 2005).

A Figura 6 permite duas observações importantes. A primeira é que os modelos A, B e C reproduzem melhor os resultados experimentais no curto prazo (até 560 dias). A segunda é que, para tempos maiores, os modelos claramente superestimam a função resposta de geração de metano obtida experimentalmente. Mais dados experimentais seriam importantes para conhecer o comportamento no longo prazo. Portanto, pode-se dizer que a função resposta para geração de metano obtida na célula experimental representa condições de biodegradação rápida devido aos 600 dias de observação. Os parâmetros apresentados pelo Modelo A se restringem à categoria de materiais de rápida biodegradação. Já os valores de k apresentados pelos modelos B e C contêm informação de longo prazo, pois utilizam valores de L em seus modelos, considerando essas duas categorias de biodegradação.

A primeira observação é explicada pelo fato de, nos modelos de primeira ordem, a taxa da geração de metano depender do produto entre L e k , isto é, (Lk) (Equação 1). Os valores numéricos deste produto para os modelos A, B e C são 266,6, 264,6 e 261,4, respectivamente. Isso explica por que todos fornecem praticamente a mesma taxa de geração de metano, entre um e dois anos após a deposição dos resíduos em um aterro sanitário.

As diferenças aparecem no longo prazo devido às diferentes constantes de biodegradação. Por exemplo, considerando um período de 10 anos após a deposição, os modelos A, B e C fornecem uma taxa de geração de metano de 16, 50 e 60% do valor inicial, respectivamente. Ou seja, no Modelo A quase todo o metano já teria sido gerado. Este resultado é observado em estudos de aterros em áreas tropicais e subtropicais. Segundo Mor *et al.* (2006), em seus estudos na região de Nova Deli, a taxa de geração de metano cessaria por volta do 15º ano após a deposição dos resíduos. Este resultado está de acordo com o Modelo A, com $k=0,18 \pm 0,13 \text{ ano}^{-1}$.

O balanço de metano realizado neste trabalho não levou em conta sua taxa de oxidação na cobertura da célula experimental. Este valor é estimado em estudos por ser responsável por cerca de 15% da taxa de geração de metano. A consideração desta parcela aumentaria na mesma proporção o produto entre L e k . Isto deve ser objeto de estudo futuro, contudo, ressaltamos que as incertezas associadas aos resultados apresentados neste trabalho são muito superiores a 15%.

CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados os resultados obtidos sobre o comportamento cinético da geração de metano em um aterro sanitário na região de São Paulo (SP). Uma célula experimental foi construída especialmente para esse objetivo. A função resposta temporal da célula para geração de metano devido à deposição de resíduos sólidos foi obtida ao longo de 600 dias. Os parâmetros cinéticos L e k foram determinados por meio de ajustes do modelo de primeira ordem exponencial à função resposta obtida experimentalmente. O tempo de latência para início da geração de metano foi de 0,52 ano. Entre o 400º e o 500º dia após a deposição de resíduos houve uma fase de grande geração de metano (fase anaeróbia metanogênica estável) e, após o 560º dia, a taxa de geração começou a diminuir de forma relevante. Os resultados apresentados, coletados durante 600 dias, mostram apenas o comportamento da geração de metano a partir dos materiais de rápida biodegradação.

Os resultados obtidos na célula experimental indicam que a geração de metano nos aterros sanitários brasileiros (regiões úmidas de clima tropical e subtropical) ocorre de forma acelerada, ou seja, com parâmetros cinéticos de rápida biodegradação. De forma geral, os valores de k tendem a ser maiores e os de L , menores em relação àqueles sugeridos pelos modelos matemáticos disponíveis na literatura. O comportamento da função resposta de geração de metano obtida experimentalmente indica uma redução acentuada na taxa de geração após dois anos. Contudo, esses resultados devem ainda ser confirmados por meio de observações no longo prazo. Uma comprovação desta observação pode ser obtida a partir da experiência brasileira nos aterros sanitários que comercializaram créditos de carbono, como é o caso do Aterro Sanitário de Caieiras. Os projetos de comercialização de créditos de

carbono são dimensionados a partir de modelos de geração de metano de primeira ordem (IPCC, 2006; USEPA, 2005). Se o dimensionamento for realizado de maneira inadequada, superestimando a produção de metano e, conseqüentemente, a geração de créditos de carbono, podem ocorrer prejuízos. Isto aconteceu em dois aterros sanitários de grande porte na cidade de São Paulo.

Nestes aterros foram adotadas metas de produção de metano que não estão sendo cumpridas, com o encerramento da deposição de resíduos. Em um deles, após o encerramento das atividades de deposição, a produção de metano caiu significativamente. Em outro, após as atividades operacionais cessarem, observou-se a mesma tendência. Estes dois casos mostram a importância de avaliar adequadamente os parâmetros cinéticos da produção de metano em aterros sanitários. O Aterro Sanitário de Caieiras apresenta características bastante semelhantes a esses dois empreendimentos.

Assim, neste trabalho, sugere-se que seja adotado o conjunto de parâmetros do Modelo A, ou seja, de rápida biodegradação, para a realização de estudos de viabilidade econômica do aproveitamento comercial do metano produzido. Parece mais seguro adotar, nos projetos de geração

de créditos de carbono e produção de energia elétrica em aterros sanitários, valores mais conservadores de geração de metano. O Modelo A, de rápida biodegradação, indica que a taxa de geração de metano para fins comerciais praticamente se encerra em 10 anos (taxa de geração reduzida a 16%). Se, além deste período, continuar a ocorrer geração de metano, esta poderá ser considerada uma receita extra do empreendimento.

Por outro lado, para a estimativa de impactos ambientais, é mais apropriado utilizar parâmetros que maximizem a taxa de geração de metano a fim de avaliar medidas de remediação e controle. Neste caso, os parâmetros dos modelos B e C parecem mais indicados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa Essencis Soluções Ambientais, o apoio fornecido durante a realização das pesquisas; e aos revisores, que muito contribuíram com comentários que enriqueceram este trabalho. Finalmente, agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), os apoios financeiros diversos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F.V. (2014) *Biogás: economia, regulação e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Interciência. 196 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). (2016) *Resíduos Sólidos*. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/energias-renovaveis/residuos-solidos/>>. Acesso em: dez. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). (2013) *Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos*. São Paulo: ABRELPE. 109 p.
- _____. (2016) *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2015*. São Paulo: ABRELPE. 92 p.
- BANCO MUNDIAL. (2003) *Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe*. Disponível em: <http://www.web-resol.org/site/trabalhos_tecnicos3.php?id=1206>. Acesso em: jan. 2013.
- BARROS, R.M. (2013) *Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Interciência. 357 p.
- BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L.; SILVA, T.R. (2014) The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, v. 65, p. 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>
- BARROS, R.T.V. (2012) *Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos*. Belo Horizonte: Tessitura. 424 p.
- BOGNER, J.; SPOKAS, K. (1995) The landfill methane balance: model and practical applications. *In: INTERNATIONAL LANDFILL CONFERENCE*, Cagliari, Sardinha, Itália. Itália: ISWA. p. 234-42.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso: mai. 2018.
- BRITTO, M.L.C.P.S. (2006) *Taxa de emissão de biogás e parâmetros de biodegradação de resíduos sólidos urbanos no Aterro Metropolitano Centro*. 185 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- CANDIANI, G. (2011) *Estudo da geração de metano em uma célula de aterro sanitário*. 173 f. Tese (Doutorado em Energia) - Universidade Federal do ABC, Santo André.
- CANDIANI, G.; MOREIRA, J.M.L. (2015) *Estudo da Geração de Metano em uma Célula de Aterro Sanitário*. Jundiaí: Paco Editorial. 176 p.
- CHRISTOPHERSEN, M.; KJELDSEN, P.; HOLST, H.; CHANTON, J. (2011) Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emission and methane oxidation. *Waste Management and Research*, v. 19, p. 595-612. <https://doi.org/10.1177/0734242X0101900616>
- ESSENCIS SOLUÇÕES AMBIENTAIS S.A. (ESSENCIS). (2016) *Relatório Ambiental: CTVA-Caieiras*. Caieiras: ESSENCIS. 325 p.

- FAOUR, A.A.; REINHART, D.R.; YOU, H. (2006) First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. *Waste Management*, v. 27, p. 946-953. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.05.007>
- FEI, X.; ZEKOS, D.; RASKIN, L. (2016) Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments. *Waste Management*, v. 55, p. 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.015>
- HILDEBRAND, F.B. (1992) *Methods of applied mathematics*. 2. ed. New York: Dover Publications. 510 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2006) *Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual*. IPCC. v. 3. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em: mar. 2013.
- LEME, M.M.V.; ROCHA, M.H.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; LOPES, B.M.; SILVA, C.H.F. (2014) Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 87, p. 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>
- MACHADO, S.L.; CARVALHO, M.F.; GOURC, J.P.; VILAR, O.M.; NASCIMENTO, J.C.F. (2009) Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results. *Waste Management*, v. 29, p. 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.017>
- MACIEL, F.J.; JUCÁ, J.F.T. (2011) Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, v. 31, p. 966-977. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.030>
- MOR, S.; RAVINDRA, K.; VISSCHER, A.D.; DAHIYA, R.P.; CHANDRA, A. (2006) Municipal solid waste characterization and its assessment for potential methane generation: a case study. *Science of the Total Environment*, v. 371, p. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.04.014>
- MOREIRA, J.M.L.; CANDIANI, G. (2016) Assessment of methane generation, oxidation, and emission in a subtropical landfill test cell. *Environmental Monitoring Assessment*, v. 188, p. 464-472. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5460-7>
- MOREIRA, J.M.L.; SILVA, E.R.; CANDIANI, G. (2015) Approximate Estimation of Landfill Emissions Considering Methane Oxidation. *The Open Waste Management Journal*, v. 8, p. 12-20. <https://doi.org/10.2174/1876400201508010012>
- MOU, Z.; SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. (2015) Evaluating the methane generation rate constant (k value) of low-organic waste at Danish landfills. *Waste Management*, v. 35, p. 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.003>
- NADALETTI, W.C.; CREMONEZ, P.A.; SOUZA, S.N.M.; BARICCATTI, R.A.; BELLI FILHO, P.; SECCO, D. (2015) Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 277-283. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.052>
- SCHEUTZ, C.; FREDENSLUND, A.M.; NEDENSKOV, J.; SAMUELSSON, J.; KJELDSEN, P. (2011) Gas production, composition and emission at a modern disposal site receiving waste with a low-organic content. *Waste Management*, v. 31, p. 946-955. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.021>
- SOUZA, S.N.M.; HORTTANAINEN, M.; ANTONELLI, J.; KLAUS, O.; LINDINO, C.A.; NOGUEIRA, C.E.C. (2014) Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. *Waste Management & Research*, v. 32, n. 10, p. 1015-1023. <https://doi.org/10.1177/0734242X14552553>
- SPOKAS, K.; BOGNER, J.; CHANTON, J.P.; MORCET, M.; ARAN, C.; GRAFF, C.; GOLVAN, Y.M.; HEBE, I. (2006) Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, v. 26, p. 516-525. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.021>
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VINIL, S. (1993) *Integrated Solid Waste Management: engineering principles and management issues*. Estados Unidos: McGraw-Hill. 938 p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2005) *Landfill Gas Emissions Model: Version 3.02 User's Guide*. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>>. Acesso em: fev. 2013.
- VIANA, E.; SILVEIRA, A.I.; MARTINHO, G. (2015) *Caracterização de resíduos sólidos: uma abordagem metodológica e propositiva*. São Paulo: Biblioteca 24 horas. 178 p.
- WANGYAO, K.; YAMADA, M.; ENDO, K.; ISHIGAKI, T.; NARUOKA, T.; TOWPRAYOON, S.; CHIEMCHAISRI, C.; SUTTHASI, N. (2010) Methane Generation Rate Constant in Tropical Landfill. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, v. 1, p. 181-184.