



# Modelagem estatística para estimativa do potencial metanogênico de dejetos suíno

## *Statistical modeling to estimate the methanogenic potential of swine manure*

Eduarda Lorençon\*, Thiago Edwiges†, Larissa Maria Silveira Pereira‡, Eduardo de Paula Schulz§

### RESUMO

A determinação do potencial bioquímico de metano (PBM) é uma técnica imprescindível na tomada de decisão em escala real, que requer tempo significativo e estrutura especializada. Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver modelos estatísticos para predição do PBM de dejetos suíno a partir da composição macromolecular, a fim de reduzir o tempo de obtenção dos dados. Foram determinados os teores de proteínas (PT), lipídios (LP) e carboidratos totais (CT), além do PBM por meio de testes em batelada para o desenvolvimento dos modelos de regressão usando o software Minitab 17. O melhor modelo de regressão gerado com uma, duas e três variáveis foi:  $PBM = -29,3 + 8,23 CT$  (1);  $PBM = 40 + 7,86 CT - 1,76 PT$  (2); e  $PBM = 14411 - 136 CT - 145 PT - 147 LP$  (3), respectivamente. O coeficiente de determinação dos modelos estatísticos foi de 77,7, 78,8 e 86,7% para o modelo 1, 2 e 3, respectivamente. Portanto, a análise de regressão mostra-se um método interessante para predição do PBM de dejetos suíno, a fim de obter os dados com agilidade e auxiliar na viabilidade técnica e econômica de plantas de biogás em escala real.

**Palavras-chave:** digestão anaeróbia, potencial bioquímico de metano, modelos estatísticos, teste em batelada

### ABSTRACT

The determination of the biochemical methane potential (BMP) is an essential technique in decision-making on a real scale, which requires significant time and specialized structure. Therefore, the aim of this study was to develop statistical models to predict the BMP of swine manure from the macromolecular composition, in order to reduce the time to obtain the data. Protein (PT), lipid (LP) and total carbohydrate (TC) contents were determined, as well as BMP through batch tests for the development of regression models using Minitab 17 software. The best regression model generated with one, two and three variables was:  $BMP = -29.3 + 8.23 CT$  (1);  $BMP = 40 + 7.86 CT - 1.76 PT$  (2); and  $BMP = 14411 - 136 CT - 145 PT - 147 LP$  (3), respectively. The coefficient of determination of the statistical models was 77.7, 78.8 and 86.7% for models 1, 2 and 3, respectively. Therefore, regression analysis proves to be an interesting method for predicting the BMP of swine manure, in order to obtain data quickly and assist in the technical and economic feasibility of biogas plants in real scale.

**Keywords:** anaerobic digestion, biochemical methane potential, statistical models, batch test

## 1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da suinocultura vem crescendo cada vez mais para atender as necessidades da população mundial e o Brasil tem papel fundamental neste âmbito o qual é um dos maiores produtores de

\* Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil; [eduardalorencon@hotmail.com](mailto:eduardalorencon@hotmail.com)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira; [thiago.edwiges@gmail.com](mailto:thiago.edwiges@gmail.com)

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil; [larissa.2018@utfpr.edu.br](mailto:larissa.2018@utfpr.edu.br)

§ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil; [eduardodepaulaschulz@gmail.com](mailto:eduardodepaulaschulz@gmail.com)



carnes do mundo. Em 2020, o Brasil foi o quarto maior produtor mundial de carne suína com 4,436 milhões de toneladas, o qual destaca-se a região sul que representou 66% da produção desta proteína no país (ABPA, 2021).

Os problemas ambientais também têm se intensificado em função da grande quantidade de resíduos provenientes da suinocultura que precisam de tratamento antes da disposição final. Desta forma, busca-se minimizar a poluição de águas superficiais e subterrâneas por matéria orgânica, nutrientes, coliformes fecais e sedimentos e, do ar, pelas emissões de amônia ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ) (KUNZ; HIGARASHI; OLIVEIRA, 2005). Deste modo há necessidade de alternativas que permitam otimizar os processos ao agregar algum valor aos resíduos. Nesse sentido, a degradação da matéria orgânica por digestão anaeróbia torna-se atrativa, pois contribui para o tratamento dos resíduos, pode produzir um biofertilizante para uso agrícola e reduzir os odores provenientes dos dejetos, além de gerar biogás para o aproveitamento energético (LI; CHEN; WU, 2019).

O processo de digestão anaeróbia é realizado por diferentes grupos de microrganismos em sintrofia, que atacam a estrutura de materiais orgânicos complexos, produzindo o biogás que é composto, principalmente, de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  (TABATABAEI et al., 2020). O metano gerado nos reatores pode ser aproveitado como fonte de energia elétrica, combustível veicular e calor, substituindo a lenha em aviários de aves de corte por exemplo (PASQUAL et al., 2018). Contudo, a implementação de biodigestores anaeróbios requer conhecimento do potencial metanogênico o qual, usualmente, é determinado por testes em batelada que exigem tempo significativo (STRÖMBERG; NISTOR; LIU, 2015). Assim, a utilização de um método rápido e de baixo custo para obtenção destes dados é uma alternativa interessante, além de não exigir equipamentos sofisticados e mão de obra especializada.

Deste modo, o objetivo deste estudo foi desenvolver modelos estatísticos para prever o potencial bioquímico de metano (PBM) de dejetos da suinocultura a partir da composição macromolecular desses resíduos, visando reduzir custos e o tempo de geração de dados, além de apoiar a tomada de decisão em escala real.

## 2 MÉTODO

### 2.1 Coleta e caracterização dos substratos

As coletas dos dejetos suínos (DS) foram realizadas em propriedades rurais localizadas na Região Oeste do Paraná entre outubro de 2020 e fevereiro de 2021. As amostragens foram realizadas em único ponto (caixa de passagem dos dejetos) em propriedades classificadas como unidade produtora de leitões (ULP), unidade de terminação (TER) e unidade de crechário (CRE). Além disso, foi realizado um levantamento preliminar de informações das propriedades para melhor entendimento do sistema de manejo adotado em cada propriedade. As análises físico-químicas e demais atividades necessárias foram realizadas na UTFPR do Campus Medianeira.

Primeiramente, uma fração das amostras foi colocada em estufa a 50 °C para secagem, até ser possível realizar a moagem em liquidificador para uso posterior na determinação macromolecular. Após serem moídas, as amostras secas foram devidamente armazenadas e refrigeradas a  $\pm 4$  °C, bem como a fração bruta das amostras. A caracterização físico-química das amostras foi realizada conforme metodologias apresentadas no Quadro 1.



**Quadro 1 – Parâmetros de caracterização do inóculo e dos substratos**

Parâmetros	Unidade	Método	Referência
pH	-	4500 H <sup>+</sup>	APHA (2005)
Sólidos totais (ST)	%	2540 G	APHA (2005)
Sólidos voláteis (SV)	% <sub>ST</sub>	2540 G	APHA (2005)
Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)	% <sub>ST</sub>	Micro-Kjeldahl	Malavolta et al. (1997)
Proteína (PT)	% <sub>ST</sub>	Composição centesimal	FAO (2002)
Lipídio (LP)	% <sub>ST</sub>	Extração Soxhlet	Cecchi (1999)
Carboidrato total (CT)	% <sub>ST</sub>	Composição centesimal	FAO (2002)

Fonte: Autoria própria (2021)

## 2.2 Teste em batelada para determinação do PBM

Para a determinação do PBM foi coletado inóculo composto de uma mistura de digestatos no centro internacional de energias renováveis – Cibiogás (Foz do Iguaçu/PR). O inóculo foi desgaseificado em incubadora a 37 °C durante 5 a 7 dias e posteriormente foi determinado ST, SV e pH. Os testes em batelada foram realizados em triplicata em reatores de vidro de 125 mL com relação inóculo/substrato de 2/1 com base em SV. Além das amostras com inóculo foi incubada amostra de celulose microcristalina utilizada como controle positivo para garantir a qualidade do inóculo. Foi recirculado gás nitrogênio dentro dos reatores para tornar o ambiente interno instantaneamente anaeróbio, acelerando o processo de digestão pelos microrganismos. Posteriormente, os reatores foram vedados e acondicionados em incubadora a 37 °C.

A medição do biogás foi efetuada com seringa de vidro e com auxílio de um manômetro para equiparar a pressão interna do frasco com a pressão atmosférica. Nos primeiros dez dias a leitura foi realizada diariamente com intervalos posteriores de 2 a 3 dias até que a produção de biogás fosse equivalente a menos de 1% do volume total acumulado. As porções de biogás foram normalizadas nas condições padrão de temperatura e pressão. A composição do biogás foi determinada por cromatografia gasosa no 5º, 15º e 25º dias do teste, obtendo-se os teores de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.

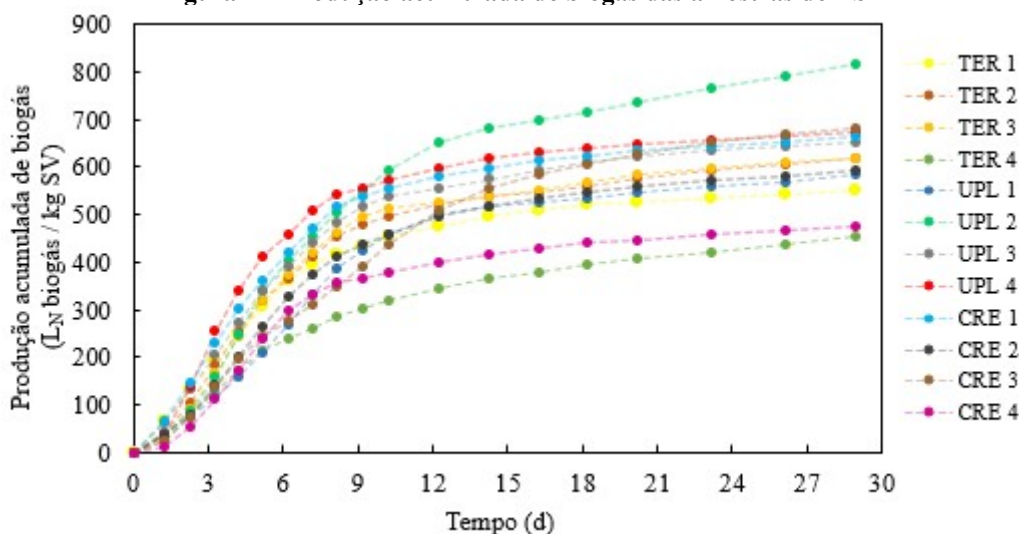
## 2.3 Modelagem estatística

Os modelos de regressão estatística foram gerados utilizando o software Minitab 17. O PBM foi testado como variável dependente e as frações de proteínas (PT), carboidratos totais (CT) e lipídios (LP) foram utilizadas como variáveis independentes, gerando modelos de regressão para prever o PBM de amostras DS. Foram escolhidos os melhores modelos com uma, duas e três variáveis independentes, considerando o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), o *p*-valor e o erro padrão de regressão (EP).

# 3 RESULTADOS

## 3.1 Caracterização e produção de biogás das amostras

O pH do inóculo utilizado no teste em batelada foi de 8,4, o teor de ST de 2,9% e o teor de SV de 71,4%<sub>ST</sub>. Estes valores estão dentro da faixa recomendada por Holliger et al. (2016), o qual discorre que valores de pH entre 7,0-8,5 e de SV ≥ 50%<sub>ST</sub> garantem um bom desempenho na degradação da matéria orgânica, contribuindo para a produção de biogás. Na Figura 2 são apresentadas as curvas de produção acumulada de biogás.

**Figura 2 – Produção acumulada de biogás das amostras de DS**


Fonte: Autoria própria (2021)

O potencial bioquímico de biogás (PBB) médio das amostras foi de  $615 \text{ L}_N \text{ kg SV}^{-1}$ , sendo a UPL 2 com o maior PBB de  $815 \text{ L}_N \text{ kg SV}^{-1}$  e a TER 4 o menor valor de  $453 \text{ L}_N \text{ kg SV}^{-1}$ . Essa discrepância dos valores de PBB corroboram a heterogeneidade das amostras de DS, que existe por conta do sistema de manejo adotado e da composição das rações utilizadas na alimentação dos suínos. Conforme a Tabela 1, o teor médio de  $\text{CH}_4$  das amostras foi de  $73 \pm 3,6\%$ , indicando bom funcionamento do processo de digestão anaeróbia e assim produção de biogás com elevado potencial energético. O PBM médio das amostras de DS foi de  $434 \pm 76,7 \text{ L}_N \text{ CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ , variando de  $324 \text{ L}_N \text{ CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  a  $616 \text{ L}_N \text{ CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$  para TER 4 e UPL 2, respectivamente. Kafle e Chen (2016) encontraram PBM semelhante de  $323 \text{ L}_N \text{ CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ .

**Tabela 1 – Caracterização físico-química e PBM das amostras de DS**

Amostra	pH	ST (%)	SV (% <sub>ST</sub> )	PT (% <sub>ST</sub> )	LP (% <sub>ST</sub> )	CT (% <sub>ST</sub> )	Teor de $\text{CH}_4$ (%)	PBM ( $\text{L}_N \text{ CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$ )
UPL 1	7,9	1,2	60,0	16,0	8,7	74,8	$79 \pm 2$	$460 \pm 8$
UPL 2	7,7	1,8	69,5	19,9	9,3	70,3	$76 \pm 4$	$616 \pm 15$
UPL 3	7,5	1,4	69,1	25,0	8,1	66,5	$74 \pm 3$	$438 \pm 27$
UPL 4	6,8	1,5	75,7	27,0	13,0	59,6	$68 \pm 4$	$444 \pm 28$
TER 1	8,1	0,8	66,4	28,5	13,2	58,0	$76 \pm 4$	$405 \pm 15$
TER 2	8,2	1,4	70,4	26,2	16,7	56,7	$73 \pm 3$	$440 \pm 20$
TER 3	7,3	3,4	73,5	30,2	20,2	48,7	$69 \pm 4$	$413 \pm 18$
TER 4	7,5	2,5	71,8	15,4	17,4	66,5	$74 \pm 3$	$324 \pm 10$
CRE 1	6,9	0,8	74,3	38,6	4,1	57,8	$69 \pm 1$	$444 \pm 43$
CRE 2	7,1	2,6	78,1	27,0	22,3	50,1	$69 \pm 6$	$398 \pm 23$
CRE 3	7,0	1,0	70,7	25,2	20,9	53,7	$75 \pm 3$	$498 \pm 24$
CRE 4	6,9	3,5	81,6	25,9	29,1	44,4	$70 \pm 5$	$325 \pm 36$
Média	7,4	1,8	71,8	25,4	15,3	58,9	73	434
DP	0,5	0,9	5,6	6,3	7,2	9,2	3,6	76,7
CV (%)	6,7	51,7	7,8	24,6	47,1	15,6	20,3	5,7

UPL 1-4: unidade produtora de leitões; TER 1-4: unidade de terminação; CRE 1-4: unidade de crechário; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; PT: proteína; LP: lipídio; CT: carboidrato total; PBM: potencial bioquímico de metano.

Fonte: Autoria própria (2021).



O pH médio das amostras de DS foi de  $7,4 \pm 0,5$ , valor semelhante ao relatado por Kougiyas, Kotsopoulos e Martzopoulos (2014) de 7,38, refletindo o potencial deste tipo de resíduo para o tratamento por digestão anaeróbia. O teor de ST e SV dos DS foi de  $1,8 \pm 0,9\%$  e  $71,8 \pm 5,6\%_{ST}$ , respectivamente, indicando alta diluição das amostras por conta do manejo dos dejetos. O teor de proteínas e lipídios dos DS foi de  $25,4 \pm 6,3\%_{ST}$  e  $15,3 \pm 7,2\%_{ST}$ , respectivamente, próximos aos valores encontrados por Kafle e Chen (2016) de 26,8% para PT e 9,4% para LP.

### 3.2 Modelos estatísticos para predição do PBM

As amostras UPL 1, TER 4 e CRE 3 foram retiradas da análise estatística, visto que estas amostras estavam distantes das demais, e então interferindo negativamente na precisão dos modelos de regressão. Na Tabela 2 são apresentados os melhores modelos de regressão de variável única e múltipla.

Tabela 2 – Modelos de regressão para prever o PBM

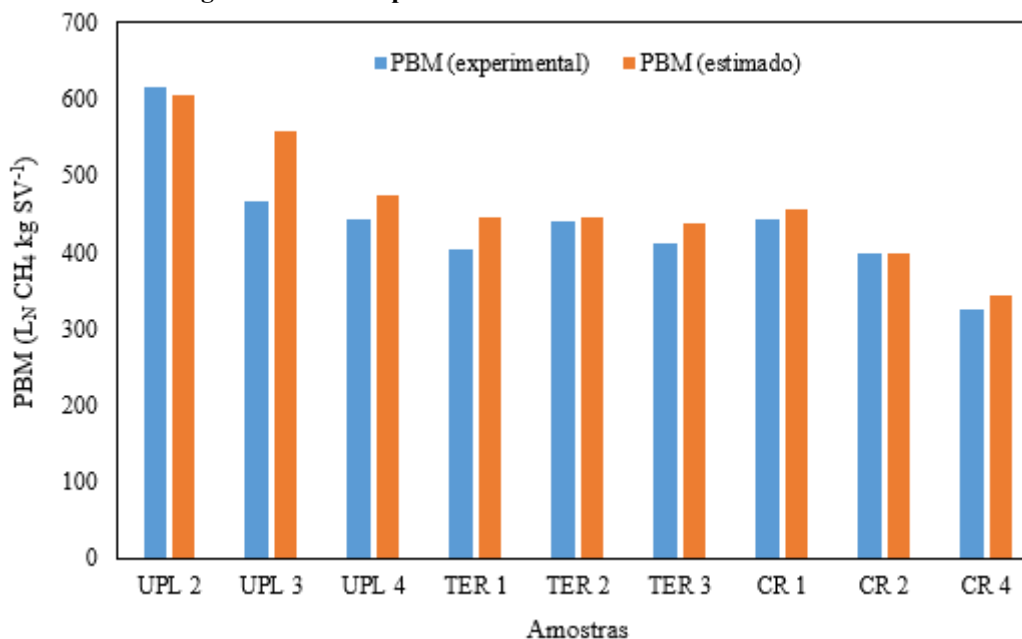
Variável	Equação	R <sup>2</sup>	p-valor	EP
1 CT	$PBM = -29,3 + 8,23 CT$	77,7	0,002	39,4
2 CT e PT	$PBM = 40 + 7,86 CT - 1,76 PT$	78,8	0,010	41,5
3 CT, PT e LP	$PBM = 14411 - 136 CT - 145 PT - 147 LP$	86,7	0,012	35,9

CT: carboidrato total; PT: proteína; LP: lipídio; PBM expresso em  $L_N CH_4 kg SV^{-1}$ ; EP: erro padrão.

Fonte: A autoria própria (2021)

O melhor modelo de regressão para prever o PBM com variável única foi o modelo 1, que utilizou o teor de CT. Quando foi adicionado PT ao modelo de regressão, não houve mudança significativa, deste modo o modelo 1 se mostra mais viável que o modelo 2, pois não há a necessidade de determinação do teor de PT. Utilizando as três variáveis (modelo 3) o R<sup>2</sup> e o EP apresentaram melhora, indicando que este modelo de regressão é o mais preciso para prever o PBM de amostras de DS. A Figura 3 apresenta o PBM determinado pelo teste em batelada e o PBM estimado pelo modelo de regressão 3.

Figura 3 – PBM experimental e estimado das amostras de DS



Fonte: A autoria própria (2021)





Comparando o PBM experimental e o estimado, é possível observar que de modo geral o modelo 3 previu o PBM de forma satisfatória, visto que há pouca diferença entre os valores. Sobretudo, este modelo resultou em estimativas com erro abaixo de 10% do PBM, exceto para a UPL 3 que foi relatado erro de 19%.

#### 4 CONCLUSÃO

Com base no objetivo proposto, este estudo confirmou que as frações de PT, LP e CT podem ser usadas para prever o PBM de resíduos da produção de suínos. O modelo de regressão foi melhorado quando os teores de PT e LP foram incluídos no modelo com CT, visto que LP e PT possuem potencial de produção de biogás maior se comparados aos CT. No entanto, o modelo pode ser aperfeiçoado para aumentar a precisão da predição do PBM, uma vez que os CT têm em sua composição a lignina que não é biodegradável, prejudicando a conversão da biomassa em biogás. Deste modo, a fração de lignina poderia ser objeto de estudo para ser utilizada na predição do PBM em estudos futuros.

#### REFERÊNCIAS

- ABPA. Associação Brasileira Proteína Animal. **Estatística do setor - suínos**. 2019. Disponível em: <<https://abpa-br.org/mercados/>>. Acesso em: 21 de julho de 2021.
- APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21<sup>st</sup> ed. Washington: American Water Works Association, p. 1368, 2005.
- CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de Alimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, p 208, 1999.
- FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food and Nutrition Paper 77: Food Energy (Methods of Analysis and Conversion Factors)**. FAO: 2002
- HOLLIGER, C. et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016.
- KAFLE, G. K.; CHEN, L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. **Waste Management**, v. 48, p. 492–502, 2016.
- KOUGIAS, P. G.; KOTSPOULOS, T. A.; MARTZOPOULOS, G. G. Effect of feedstock composition and organic loading rate during the mesophilic co-digestion of olive mill wastewater and swine manure. **Renewable Energy**, v. 69, p. 202–207, 2014.
- KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. DE. Tecnologias De Manejo E Tratamento De Dejetos De Suínos Estudadas No Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 22, n. 3, p. 651–665, 2005.
- LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. **Applied Energy**, v. 240, n. June 2018, p. 120–137, 2019.
- MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 5<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, p 292, 1989.
- PASQUAL, J. C. et al. Assessment of collective production of biomethane from livestock waste for urban transportation mobility in Brazil and the United States. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 1–19, 2018.
- STRÖMBERG, S.; NISTOR, M.; LIU, J. Early prediction of Biochemical Methane Potential through statistical and kinetic modelling of initial gas production. **Bioresource Technology**, v. 176, p. 233–241, 1 jan. 2015.
- TABATABAEI, M. et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 2: Mainstream and downstream strategies. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1392–1407, 2020.