

RELATÓRIO FINAL DE PÓS-DOCTORADO

Modelagem fuzzy dos teores de nutrientes no solo em resposta a diferentes doses de biofertilizante suíno líquido

Pós-doutorando: Bruno César Góes

Supervisor: Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Unidade: Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã

Programa: Programa de Pós-Doutorado da Unesp

Período: 01/11/2022 a 01/11/2024

Tupã – SP

2024

Identificação do relatório

Título do projeto:	Modelagem fuzzy dos teores de nutrientes no solo em resposta a diferentes doses de biofertilizante suíno líquido
Programa:	Programa de Pós-Doutorado da Unesp
Unidade universitária:	Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã
Universidade:	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Pós-doutorando:	Bruno César Góes
Supervisor:	Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho
Grande área:	Ciências Agrárias
Área:	Engenharia Agrícola
Subárea:	Engenharia de Água e Solo
Período de execução:	01/11/2022 a 01/11/2024
Local de realização:	Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Este relatório apresenta as atividades desenvolvidas pelo pós-doutorando Bruno César Góes no âmbito do Programa de Pós-Doutorado da Unesp, sob supervisão do Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho. O estudo teve como foco a modelagem fuzzy dos teores de nutrientes no solo em resposta à aplicação de diferentes doses de biofertilizante suíno líquido, utilizando dados oriundos de pesquisa experimental previamente conduzida sob coordenação do próprio pós-doutorando. A proposta articula experimentação agrônômica, análise estatística e inteligência computacional, com vistas à construção de uma ferramenta interpretativa e preditiva para apoio ao manejo sustentável de biofertilizantes.

Resumo

O uso de biofertilizante suíno líquido constitui uma alternativa relevante para o aproveitamento agrônomo de resíduos da suinocultura, contribuindo para a fertilidade do solo, para a redução da dependência de fertilizantes sintéticos e para o fortalecimento de práticas agrícolas sustentáveis. Entretanto, a resposta dos atributos químicos do solo à aplicação de biofertilizantes pode apresentar comportamento não linear, variável e de difícil interpretação por métodos estatísticos tradicionais isolados.

Neste relatório, foi desenvolvido um sistema de modelagem fuzzy para representar a resposta de atributos químicos do solo à aplicação de diferentes doses de biofertilizante suíno líquido. O estudo considerou dados experimentais oriundos de pesquisa conduzida sob coordenação do próprio pós-doutorando, em delineamento inteiramente casualizado, com doses de 0, 10, 20, 40, 80 e 160 ml de biofertilizante por vaso. Foram analisadas as variáveis pH, matéria orgânica, potássio, magnésio, boro, manganês e saturação por bases, selecionadas a partir de análises estatísticas preliminares.

Foram construídos e comparados modelos fuzzy com funções de pertinência triangulares e trapezoidais para a variável de entrada dose de biofertilizante. Os resultados foram comparados com modelos de regressão quadrática, utilizando-se o coeficiente de determinação e a raiz do erro quadrático médio como critérios de desempenho. De modo geral, os modelos fuzzy apresentaram desempenho superior aos modelos de regressão, com destaque para o modelo triangular, que apresentou leve vantagem em relação ao modelo trapezoidal na maioria das variáveis avaliadas.

Os resultados indicam que a lógica fuzzy constitui uma abordagem promissora para representar a resposta de atributos químicos do solo à aplicação de biofertilizante suíno líquido, especialmente por permitir a integração entre dados experimentais, interpretação agrônoma e raciocínio linguístico. O sistema proposto mostrou potencial para apoiar decisões relacionadas ao manejo sustentável de biofertilizantes em sistemas agrícolas.

Palavras-chave: lógica fuzzy; biofertilizante suíno; fertilidade do solo; inteligência computacional; agricultura sustentável.

Sumário

Resumo	2
1 Introdução	5
2 Objetivos	6
2.1 Objetivo geral	7
2.2 Objetivos específicos	7
3 Fundamentação teórica	7
3.1 Biofertilizante suíno, sustentabilidade e fertilidade do solo	7
3.2 Análise estatística dos atributos químicos do solo	8
3.3 Lógica fuzzy como ferramenta de modelagem agronômica	10
4 Material e métodos	11
4.1 Origem dos dados experimentais	11
4.2 Caracterização da etapa experimental	12
4.3 Delineamento experimental e doses avaliadas	13
4.4 Variáveis químicas selecionadas	14
4.5 Análise estatística preliminar	15
4.6 Construção do sistema fuzzy	15
4.7 Formalização matemática do sistema fuzzy	16
4.8 Funções de pertinência triangulares e trapezoidais	17
4.8.1 Representação gráfica das funções de pertinência da variável de entrada	19
4.9 Base de regras fuzzy	20
4.10 Critérios de avaliação dos modelos	20
4.11 Ferramentas computacionais utilizadas	21
4.12 Agrupamento fuzzy e apoio conceitual do Fuzzy C-Means	22
5 Resultados e discussão	23
5.1 Síntese da análise estatística inicial	23
5.2 Análise multivariada e correlações entre variáveis	23
5.3 Modelagem fuzzy dos atributos químicos do solo	25
5.4 Base de regras consolidada do sistema fuzzy	26
5.5 Comparação entre regressão quadrática e modelos fuzzy	28
5.6 Representação gráfica dos ajustes por variável	29
5.7 Análise visual da suavidade e da aderência dos modelos	32
5.8 Interpretação dos resultados por variável	32
5.8.1 pH	33

5.8.2	Matéria orgânica	33
5.8.3	Potássio	34
5.8.4	Magnésio	34
5.8.5	Boro	35
5.8.6	Manganês	35
5.8.7	Saturação por bases	36
5.9	Síntese comparativa do desempenho dos modelos	36
Declaração de uso de inteligência artificial		37
6	Conclusões	37

1 Introdução

A suinocultura ocupa posição de destaque no agronegócio brasileiro, tanto pela sua relevância econômica quanto pela sua contribuição para a geração de alimentos, empregos e renda em diferentes regiões do país. Entretanto, essa atividade também está associada à produção expressiva de dejetos, os quais, quando manejados de forma inadequada, podem representar risco de contaminação do solo, da água, dos animais e das pessoas, além de contribuir para a emissão de gases e para a intensificação de problemas ambientais em áreas de produção intensiva (SILVA et al., 2012).

Nesse contexto, o tratamento e o aproveitamento agronômico dos dejetos suínos constituem uma estratégia importante para integrar produção animal, sustentabilidade e economia circular. A biodigestão anaeróbia permite transformar resíduos orgânicos em produtos de maior valor ambiental e econômico, como o biogás e o biofertilizante. O biofertilizante suíno líquido, quando adequadamente tratado e aplicado, pode contribuir para a melhoria das características químicas do solo, fornecendo nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal e reduzindo, em parte, a dependência de fertilizantes minerais sintéticos (SILVA et al., 2012; FONTENELLE et al., 2017).

Estudos envolvendo esterco líquido, água residuária e digestato de origem suína indicam que esses materiais podem alterar atributos químicos relevantes do solo, incluindo disponibilidade de nutrientes, fósforo, potássio, magnésio, cálcio e indicadores associados à fertilidade (CERETTA et al., 2003; SCHERER et al., 2010; LIMA et al., 2019). Revisões sobre o uso agrícola de dejetos e digestatos também destacam seu potencial como fonte de nutrientes e como alternativa parcial aos fertilizantes minerais, embora ressaltem a necessidade de manejo criterioso para evitar perdas por lixiviação, acúmulo de nutrientes e riscos ambientais associados ao uso repetido (LIU et al., 2020; NKOA, 2014).

Apesar desse potencial, a aplicação de biofertilizantes exige critérios técnicos, pois a resposta do solo não depende apenas da dose aplicada. A composição química do biofertilizante, o tipo de solo, o teor inicial de nutrientes, o pH, a matéria orgânica, a saturação por bases e a dinâmica dos macro e micronutrientes influenciam diretamente os efeitos observados após a aplicação. Dessa forma, a interpretação da resposta do solo a diferentes doses de biofertilizante envolve relações complexas, muitas vezes não lineares, sujeitas a variações experimentais e a diferentes níveis de incerteza (RAIJ, 1991; SOUSALOBATO, 2004; MALAVOLTA, 2006).

Tradicionalmente, os efeitos de doses de fertilizantes e biofertilizantes sobre atributos químicos do solo são avaliados por meio de análise de variância, regressões, correlações e métodos multivariados. Esses procedimentos são fundamentais para identificar efeitos estatisticamente significativos, descrever tendências gerais e selecionar variáveis relevantes. No entanto, em sistemas agrícolas, nem sempre as respostas observadas se ajustam plenamente a

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo será
disponibilizado
somente a partir de 25/05/2028

Dessa forma, para o manganês, a modelagem fuzzy deve ser interpretada com cautela. O modelo contribui para a representação geral da resposta, mas os resultados sugerem que a dose de biofertilizante, isoladamente, não explica plenamente a dinâmica desse micronutriente no solo.

5.8.7 Saturação por bases

A saturação por bases apresentou resposta relevante à aplicação do biofertilizante, com melhora expressiva do desempenho nos modelos fuzzy em comparação à regressão quadrática. A regressão apresentou $R^2 = 0.567$ e $RMSE = 1.001$, enquanto o modelo fuzzy triangular alcançou $R^2 = 0.681$ e $RMSE = 0.859$. O modelo trapezoidal apresentou $R^2 = 0.678$ e $RMSE = 0.863$.

A saturação por bases é um indicador importante da fertilidade química do solo, pois expressa a proporção da capacidade de troca ocupada por cátions básicos. Valores mais elevados estão geralmente associados a melhores condições químicas para o desenvolvimento das plantas, desde que acompanhados de equilíbrio nutricional.

O ganho de desempenho dos modelos fuzzy indica que a resposta da saturação por bases às doses de biofertilizante foi melhor representada por uma abordagem capaz de lidar com transições graduais entre níveis de fertilidade. O modelo triangular novamente apresentou leve superioridade, mantendo o padrão observado nas demais variáveis.

Esses resultados sugerem que o biofertilizante suíno líquido contribuiu para alterar positivamente a condição química geral do solo, com reflexos na saturação por bases. A modelagem fuzzy mostrou-se útil para representar essa resposta de forma interpretável e compatível com a lógica de classificação agrônômica.

5.9 Síntese comparativa do desempenho dos modelos

A comparação geral entre os modelos demonstrou que a abordagem fuzzy apresentou desempenho superior à regressão quadrática em todas as variáveis analisadas. Esse resultado foi observado tanto pelo aumento dos valores de R^2 quanto pela redução dos valores de $RMSE$, indicando maior capacidade de ajuste e menor erro médio de predição.

Entre os modelos fuzzy, a estrutura triangular apresentou os melhores resultados em todas as variáveis, ainda que as diferenças em relação ao modelo trapezoidal tenham sido pequenas. Esse comportamento sugere que, para a base experimental avaliada, as funções triangulares representaram de forma mais adequada os níveis discretos de dose utilizados no experimento.

A superioridade do modelo triangular também pode ser associada à simplicidade e à maior sensibilidade em torno dos pontos centrais de cada dose. Como o experimento foi

estruturado com níveis bem definidos de aplicação de biofertilizante, as funções triangulares permitiram representar diretamente esses pontos, mantendo transições graduais entre doses adjacentes.

Apesar disso, o modelo trapezoidal também apresentou desempenho elevado e muito próximo ao triangular. Isso indica que ambas as estruturas fuzzy foram adequadas para a modelagem dos dados. A escolha do modelo triangular como principal, portanto, não decorre de inadequação do modelo trapezoidal, mas de sua leve superioridade quantitativa e de sua maior simplicidade interpretativa.

De forma geral, os resultados confirmam que a lógica fuzzy é uma ferramenta promissora para a modelagem de atributos químicos do solo em resposta à aplicação de biofertilizante suíno líquido. Além de apresentar melhor desempenho em relação à regressão quadrática, a abordagem fuzzy permite representar a resposta do solo por meio de regras linguísticas, favorecendo sua interpretação e seu potencial uso como apoio à decisão no manejo agrícola sustentável.

A análise também reforça a importância de associar o uso agrônomo de biofertilizantes a critérios técnicos de aplicação. Embora dejetos e digestatos de origem suína possam contribuir para a melhoria da fertilidade do solo e para a substituição parcial de fertilizantes sintéticos, a literatura indica que aplicações sucessivas ou mal dimensionadas podem favorecer o acúmulo de nutrientes e micronutrientes e ampliar riscos ambientais (SCHERER et al., 2010; NKOA, 2014; LIU et al., 2020).

Declaração de uso de inteligência artificial

Durante a preparação deste relatório, foi utilizada a ferramenta ChatGPT, da OpenAI, como apoio ao refinamento da redação e à melhoria da clareza do texto. Todo o conteúdo foi revisado, editado e validado pelos responsáveis pelo relatório, que assumem integral responsabilidade pela precisão, integridade e consistência científica do documento final.

6 Conclusões

O presente relatório consolidou o desenvolvimento de uma abordagem de modelagem fuzzy para representar a resposta de atributos químicos do solo à aplicação de diferentes doses de biofertilizante suíno líquido. A proposta integrou dados experimentais, análise estatística preliminar e inteligência computacional, com o objetivo de construir uma ferramenta interpretativa e preditiva voltada ao manejo agrícola sustentável.

Os resultados indicaram que a aplicação do biofertilizante suíno líquido promoveu alterações em atributos químicos relevantes do solo, especialmente naqueles relacionados à

fertilidade, como pH, matéria orgânica, potássio, magnésio, boro, manganês e saturação por bases. A seleção dessas variáveis permitiu concentrar a modelagem nos indicadores de maior interesse agrônomo e estatístico.

A comparação entre os modelos demonstrou que os sistemas fuzzy apresentaram desempenho superior aos modelos de regressão quadrática em todas as variáveis analisadas. Esse resultado foi evidenciado pelo aumento dos valores de R^2 e pela redução dos valores de RMSE, indicando maior capacidade de ajuste e menor erro médio de predição.

Entre as duas estruturas fuzzy avaliadas, o modelo com funções de pertinência triangulares apresentou leve superioridade em relação ao modelo com funções trapezoidais. Embora ambos tenham apresentado desempenho semelhante e adequado, o modelo triangular mostrou melhor equilíbrio entre precisão, simplicidade e interpretabilidade, sendo considerado a estrutura mais indicada para representar os dados analisados.

A modelagem fuzzy mostrou-se especialmente relevante por permitir representar transições graduais entre níveis de dose e níveis de resposta dos atributos químicos do solo. Essa característica é importante em sistemas agrônomo, nos quais os limites entre condições como baixa, média e alta fertilidade nem sempre são rígidos ou abruptos.

A abordagem proposta também demonstrou potencial como ferramenta de apoio à decisão, pois combina desempenho quantitativo com interpretação linguística. As regras fuzzy do tipo “SE... ENTÃO...” permitem traduzir padrões observados nos dados em uma estrutura compreensível e aplicável ao contexto agrônomo.

Conclui-se, portanto, que a lógica fuzzy constitui uma alternativa metodológica promissora para a modelagem dos efeitos do biofertilizante suíno líquido sobre atributos químicos do solo. Sua aplicação pode contribuir para o uso mais racional de biofertilizantes, favorecendo práticas agrícolas sustentáveis, o aproveitamento de resíduos da suinocultura e a redução da dependência de insumos sintéticos.

Os resultados reforçam que o uso agrônomo de biofertilizante suíno líquido deve estar associado a critérios técnicos de aplicação, monitoramento dos atributos químicos do solo e avaliação das doses utilizadas, de modo a maximizar os benefícios agrônomo e reduzir riscos ambientais associados ao uso inadequado ou sucessivo do insumo.

Como desdobramento, recomenda-se que a abordagem seja futuramente avaliada em bases experimentais ampliadas, contemplando diferentes tipos de solo, condições ambientais e culturas agrícolas. Também poderão ser exploradas técnicas complementares de inteligência computacional, como modelos neuro-fuzzy, desde que acompanhadas de validação experimental adequada.

Referências

- Alves, Lázaro Quintino (2024). “A eficiência do biodigestor na produção de biogás e biofertilizante suíno voltada para análise dos teores dos nutrientes no solo e viabilidade econômica de investimentos”. Tese (Doutorado em Agricultura Sustentável). Alfenas: Universidade Professor Edson Antônio Velano.
- Barua, Anupam, Lakshmi S. N. Mudunuri e Olga Kosheleva (2014). *Why Trapezoidal and Triangular Membership Functions Work So Well: Towards a Theoretical Explanation*. arXiv: [1408.3899 \[cs.AI\]](https://arxiv.org/abs/1408.3899). URL: <https://arxiv.org/abs/1408.3899> (acesso em 04/05/2026).
- Bezdek, James C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. New York: Plenum Press. ISBN: 9780306406713.
- Ceretta, Carlos Alberto et al. (2003). “Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural”. Em: *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38.6, pp. 729–735. DOI: [10.1590/S0100-204X2003000600009](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000600009).
- Ekhilakov, Yury P. et al. (2024). “Comparison of fuzzy logic systems based on triangular and trapezoidal membership functions”. Em: *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics* 27.1, pp. 49–62. DOI: [10.21293/1818-0442-2024-27-1-49-62](https://doi.org/10.21293/1818-0442-2024-27-1-49-62).
- Fontenelle, Mariane R. et al. (2017). *Biofertilizante Hortbio®: propriedades agronômicas e instruções para o uso*. Rel. técn. Circular Técnica 162. Brasília: Embrapa Hortaliças, p. 11. URL: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085285/biofertilizante-hortbio-propriedades-agronomicas-e-instrucoes-para-o-uso> (acesso em 03/05/2026).
- Khairuddin, Siti Hajar et al. (2021). “Generating Clustering-Based Interval Fuzzy Type-2 Triangular and Trapezoidal Membership Functions: A Structured Literature Review”. Em: *Symmetry* 13.2, p. 239. DOI: [10.3390/sym13020239](https://doi.org/10.3390/sym13020239).
- Kosheleva, Olga, Vladik Kreinovich e Shahnaz N. Shahbazova (2021). “Type-2 Fuzzy Analysis Explains Ubiquity of Triangular and Trapezoid Membership Functions”. Em: *Recent Developments and the New Direction in Soft-Computing Foundations and Applications*. Vol. 393. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer, pp. 63–75. DOI: [10.1007/978-3-030-47124-8_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47124-8_6).
- Lima, Carlos et al. (2019). “Soil changes and yield of maize fertilized with swine wastewater”. Em: *Revista Caatinga*. DOI: [10.1590/1983-21252019v32n117rc](https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n117rc).
- Liu, Shibin et al. (2020). “Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis”. Em: *Science of the Total Environment* 745, p. 141003. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.141003](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141003).

- Malavolta, Eurípedes (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres.
- Mamdani, Ebrahim H. e Sedrak Assilian (1975). “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller”. Em: *International Journal of Man-Machine Studies* 7.1, pp. 1–13. DOI: [10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).
- Nkoa, Roger (2014). “Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review”. Em: *Agronomy for Sustainable Development* 34.2, pp. 473–492. DOI: [10.1007/s13593-013-0196-z](https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z).
- Prabakaran, G., D. Vaithyanathan e M. Ganesan (2021). “Soil Fertility Review using Fuzzy Logic”. Em: *Journal of Engineering Research* 9.8, pp. 1–12. URL: <https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/13845/2633> (acesso em 04/05/2026).
- Raij, Bernardo van (1991). *Fertilidade do solo e adubação*. Piracicaba: Ceres.
- Ross, Timothy J. (2017). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 4ª ed. Chichester: Wiley. ISBN: 9781119235866.
- Scherer, Eloi Erhard, Cristiano Nunes Nesi e Zemiro Massotti (2010). “Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas de Santa Catarina”. Em: *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34.4, pp. 1375–1383. DOI: [10.1590/S0100-06832010000400034](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400034).
- Scikit-Fuzzy Developers (2024). *Scikit-Fuzzy: fuzzy logic toolbox for SciPy*. URL: <https://pythonhosted.org/scikit-fuzzy/> (acesso em 03/05/2026).
- Silva, Samuel de Assis et al. (2010). “Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon”. Em: *Revista Ciência Agronômica* 41.1, pp. 9–17. URL: <https://www.scielo.br/j/rca/a/6yQ6b5xcRgmdJYvfXSLKFcv/> (acesso em 03/05/2026).
- Silva, Wilson Tadeu Lopes da et al. (2012). “Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola”. Em: *Química Nova* 35.1, pp. 35–40. DOI: [10.1590/S0100-40422012000100007](https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000100007).
- Sousa, Djalma Martinhão Gomes de e Edson Lobato, ed. (2004). *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2ª ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.
- Zadeh, Lotfi A. (1965). “Fuzzy sets”. Em: *Information and Control* 8.3, pp. 338–353. DOI: [10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- Zimmermann, Hans-Jürgen (2010). “Fuzzy set theory”. Em: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2.3, pp. 317–332. DOI: [10.1002/wics.82](https://doi.org/10.1002/wics.82).