

Lógica Fuzzy na Simulação da Produtividade de Grãos de Aveia pelo Nitrogênio, Soma Térmica e Precipitação Pluviométrica

Cibele Luisa Peter¹, Juliana Aozane da Rosa², Odenis Alessi³, Vanessa Pansera⁴, Natiane Carolina Ferrari Basso⁵, Natália Guiotto Zardin⁶, Ivan Ricardo Carvalho⁷, José Antonio Gonzalez da Silva⁸
UNIJUÍ, IJUÍ, RS

Resumo. Na área de biosistemas a lógica fuzzy é utilizada para prever o crescimento e desenvolvimento de culturas, técnicas de manejos, planejamento de safras, dentre outros. No cultivo da aveia ela pode ser uma ferramenta satisfatória no processo de simulação da produtividade de grãos, permitindo envolver o manejo do nitrogênio com os efeitos não lineares das condições ambientais. O objetivo deste estudo é adequar uma função de pertinência satisfatória na configuração de uma base de regras que simule com eficiência por lógica fuzzy a produtividade de grãos de aveia em função das doses de nitrogênio com a ação combinada dos elementos meteorológicos em condições reais de cultivo. O estudo foi realizado nos anos de 2019 e 2020, em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições seguindo um esquema fatorial 2x7, para a forma de aplicação da ureia (sólida e dissolvida) e suas doses (0, 44, 88, 132, 176, 220 e 264 kg ha^{-1}), que correspondem as doses 0, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 kg ha^{-1} de nitrogênio, considerando o percentual de 45% de nitrogênio contido na ureia. As doses foram aplicadas em uma única aplicação na condição V_3/V_4 , estágio fenológico de terceira e quarta folha expandida. A aplicação de forma dissolvida, foi realizada com pulverizador costal em máxima pressão constante no volume de água de 300 L ha^{-1} . A função de pertinência e os valores linguísticos estabelecidos juntamente com a configuração da base de regras para as variáveis de entrada e de saída se mostram adequados para o uso da lógica fuzzy na simulação da produtividade de grãos de aveia. O modelo fuzzy proposto possibilita simular valores eficientes para a produtividade de grãos de aveia pelo uso do nitrogênio e elementos meteorológicos.

Palavras-chave. *Avena sativa L.*, inteligência artificial, lógica nebulosa

1 Introdução

A modelagem matemática e computacional vem sendo cada vez mais utilizada em diversas áreas do conhecimento, possibilitando a representação de comportamentos e a realização de simulações e previsões de diferentes fenômenos [18]. Modelos ligados a inteligência artificial vem se apresentando como uma ferramenta eficiente para a ampliação de modelos direcionados a simulação e otimização de processos [13]. Dentre estes modelos, a lógica fuzzy é uma técnica que se utiliza da programação computacional, capaz de traduzir expressões linguísticas modificando a um formato numérico,

¹cibele.peter@sou.unijui.edu.br

²juliana.aozane@sou.unijui.edu.br

³odenisalessi@sou.unijui.edu.br

⁴vanessa.pansera@sou.unijui.edu.br

⁵natiane.basso@sou.unijui.edu.br

⁶natalia.zardin@sou.unijui.edu.br

⁷ivan.carvalho@sou.unijui.edu.br

⁸jose.gonzalez@sou.unijui.edu.br

aproximando a forma de raciocínio das informações para se obter respostas próximas ao problema [11]. Por conta disto, ela é utilizada na representação de problemas complexos, permitindo a inclusão de várias variáveis no processo de modelagem [7]. No setor agrícola é vastamente buscada para prever o crescimento e desenvolvimento de culturas, técnicas de manejos, planejamento de safras, dentre outros [17]. A aveia branca (*Avena sativa L.*) é um cereal considerado alimento funcional com efeitos benéficos à saúde do consumidor, além de ser muito importante para alimentação animal [1, 10]. No seu cultivo o nitrogênio é um elemento chave para o alcance de uma boa produtividade de grãos [8]. O fornecimento de nitrogênio ocorre principalmente através da aplicação da ureia, que é um fertilizante de alta capacidade de solubilidade e alta concentração de nitrogênio (45%) [14, 9]. Porém, quando as condições de ambiente são desfavoráveis, este nutriente é facilmente perdido, ocasionando gastos de produção, além de poluição ambiental [4]. Estudos vêm reforçando a necessidade de processos inovadores que visam reduzir as perdas deste nutriente [12]. Uma possibilidade é a aplicação da ureia dissolvida em água em que o nitrogênio é absorvido via foliar, considerando que o nutriente é um elemento móvel e apresenta facilidade de absorção e translocação por dentro de um tecido vegetal [16, 6]. Desta maneira, o uso da lógica fuzzy, pode ser uma ferramenta satisfatória no processo de simulação da produtividade da aveia, pois permite envolver o manejo do nitrogênio com os efeitos não lineares das condições ambientais dos agroecossistemas. Neste contexto, o objetivo deste estudo é adequar uma função de pertinência satisfatória na configuração de uma base de regras que simule com eficiência por lógica fuzzy a produtividade de grãos de aveia em função das doses de nitrogênio com a ação combinada dos elementos meteorológicos em condições reais de cultivo.

2 Materiais e Métodos

O estudo foi desenvolvido a campo, nos anos de 2019 e 2020, na área experimental do Instituto Regional de Desenvolvimento Rural (IRDeR) em Augusto Pestana, RS, Brasil. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições, em esquema fatorial 2×7 , para a forma de aplicação da ureia (sólida e dissolvida) e suas doses (0, 44, 88, 132, 176, 220 e 264 kg ha^{-1}). Portanto, considerando o percentual de 45% de nitrogênio contido na ureia, representam as doses de 0, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 kg ha^{-1} de nitrogênio. A adubação ocorreu em uma única aplicação na condição V_3/V_4 , estágio fenológico de terceira e quarta folha expandida. A aplicação de forma dissolvida, foi realizada com pulverizador costal em máxima pressão constante no volume de água de 300 L ha^{-1} . A cultivar utilizada para a realização do experimento foi a cultivar de aveia branca Brisasul, no sistema de cultivo soja/aveia. A colheita para a estimativa da produtividade de grãos ocorreu de forma mecanizada pelo corte das três linhas centrais de cada parcela, que posteriormente foram direcionadas ao laboratório para correção da umidade de grãos para 13% e posterior pesagem para estimativa da produtividade. As variáveis meteorológicas foram obtidas pela estação meteorológica próxima a área experimental. A variável soma térmica foi obtida pelo somatório da diferença entre a temperatura média diária e a temperatura basal inferior ao desenvolvimento da cultura da aveia (4°C), no ciclo de cultivo. Após a obtenção dos dados da experimentação agrícola, foi realizada a análise de variância e a estatística descritiva da produtividade de grãos. Para a simulação via lógica fuzzy, foram utilizadas como variáveis de entrada o somatório da precipitação pluviométrica e da soma térmica, e as doses de nitrogênio e como variável de saída a produtividade de grãos. Com a ajuda de um engenheiro agrônomo com experiência na cultura da aveia, foram estabelecidas as classes e os intervalos de classes para cada variável de entrada e saída, bem como, a base de regras que abrange a lógica fuzzy. Para as doses de nitrogênio, foi considerado o domínio de intervalo $[0,60]$, pelo fato de que com doses maiores de nitrogênio não se atingiu valores expressivos de produtividades. Para a construção do modelo, utilizou-se o sistema baseado em regras fuzzy implementado pelo Toolbox Fuzzy Logic do software

Matlab, usando o método de inferência Mamdani, com o emprego do conectivo "e (\wedge)", pela função de pertinência triangular. A defuzzificação foi realizada pelo método do menor valor da função máxima de associação agregada.

Para a formalização matemática de um conjunto fuzzy, Zadeh (1965) [19] fundamentou-se que qualquer conjunto clássico pode ser caracterizado por uma função, de forma que dado um conjunto U e um subconjunto A , a função que caracteriza A é dada por [2],

$$X_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

sendo assim, X_A é uma função com domínio em U e imagem em $0, 1$, com $X_A = 1$ indicando que o elemento X pertence A , e com $X_A = 0$ indicando que o elemento X não pertence A , desta forma, a função característica é descrita por uma função sobrejetora.

Zadeh [19] sugere uma formalização matemática de imprecisões, usando os subconjuntos fuzzy, de modo que um subconjunto fuzzy F de U é caracterizado por uma função total do tipo $\mu_F \rightarrow [0, 1]$ denominada função de pertinência do subconjunto fuzzy F . Na definição do subconjunto fuzzy ampliou-se o contra-domínio da função característica, de forma que o conjunto $0, 1$ passou para o intervalo $[0, 1]$.

O valor $\mu_F : U \in [0, 1]$ indica que o elemento X de U está contido no conjunto fuzzy F , de modo que, $\mu_F(x)$ é uma função de pertinência que determina com que grau x está em F . Desta forma, temos que: $\mu_F(x) = 1$ indica que x pertence totalmente ao conjunto F ; $0 < \mu_F(x) < 1$, indica que x pertence parcialmente ao conjunto F ; $\mu_F(x) = 0$, indica que x não pertence ao conjunto F .

O subconjunto fuzzy F é composto por elementos x de U , providos de um valor de pertinência a F , dado por $\mu_F(x)$, sendo $F = \{(x, \mu_F(x)), \text{ com } x \in U\}$. A função de pertinência para um número fuzzy F triangular é dado da forma,

$$\varphi_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x \geq c \end{cases} \quad (2)$$

em que X é o que está sendo testado e 'a' e 'b' 'c' são os limites dos triângulos.

Para a simulação foram utilizados valores médios dos elementos meteorológicos dos dois anos para cada dose de nitrogênio. Para a validação dos modelos fuzzy, foram comparados os valores obtidos por simulação com os valores reais obtidos por bioexperimentação através do cálculo do erro absoluto. Para a realização deste estudo foram utilizados os softwares Genes e Matlab.

3 Resultados e Discussão

De acordo com a análise de variância (dados não apresentados) na análise dos distintos anos agrícolas houve ausência de diferença entre as fontes de nitrogênio via ureia sólida e dissolvida em água. No entanto, o uso de diferentes doses de nitrogênio evidenciou efeitos na produtividade de grãos. Desta maneira, não se verificou diferenças entre as formas de fornecimento e a ausência de interação fonte versus doses indicam mostrarem o mesmo comportamento, independente da fonte sólida ou dissolvida. Assim, as análises foram realizadas pela condição da dose de nitrogênio, não levando em consideração especificamente o tipo de fonte, condição que as inferências obtidas permitem considerar ambas as formas de aplicação. Na Tabela 1 de estatística descritiva, do sistema de cultivo soja/aveia, observa-se que as médias de precipitação pluviométrica apresentam pequena diferença do ano de 2019 para o ano de 2020. O ano de 2019, apresentou maior soma térmica em relação ao outro ano. Os valores apresentados representam os acumulados durante o ciclo de cultivo da aveia.

Tabela 1: Estatística descritiva da precipitação pluviométrica, soma térmica, produtividade de grãos, por ano agrícola e análise conjunta no sistema de cultivo soja/aveia.

Variáveis	ED	Doses de Nitrogênio ($kg\ ha^{-1}$)							IM
		0	20	40	60	80	100	120	
soja/aveia (2019)									
PG ($kg\ ha^{-1}$)	-	1540	1657	1762	1806	1874	1789	1680	-
ST ($graus\ dias^{-1}$)	-	-	-	-	-	-	-	-	1840
PL (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	650
soja/aveia (2020)									
PG ($kg\ ha^{-1}$)	-	1047	1304	1473	1621	1696	1670	1642	-
ST ($graus\ dias^{-1}$)	-	-	-	-	-	-	-	-	1640
PL (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	750
Geral(2019+2020)									
PG ($kg\ ha^{-1}$)	Média	1294	1480	1618	1714	1785	1730	1661	-
	DP	283	230	228	180	183	194	199	-
	V_{min}	934	1039	1182	1495	1373	1414	1263	-
	V_{max}	1817	1877	1971	2099	2250	2070	2026	-
ST ($graus\ dias^{-1}$)	Média								1740
	DP								141
	V_{min}								1640
	V_{max}								1840
PL (mm)	Média								700
	DP								70
	V_{min}								650
	V_{max}								750

PG = produtividade de grãos; ED = estatística descritiva; ST = soma térmica; PL = precipitação pluviométrica; IM = indicadores meteorológicos.

Na Tabela 2, está apresentada as classificações dos intervalos estabelecidos para cada variável considerada na composição do modelo fuzzy.

Tabela 2: Classes das variáveis de entrada e saída utilizadas na base de regras da lógica fuzzy para a simulação da produtividade de grãos no sistema de cultivo soja/aveia da função de pertinência triangular

Variável	Classes	Intervalo
Nitrogênio ($kg\ ha^{-1}$)	MB	[0 0 30]
	B	[15 35 50]
	M	[42 60 60]
Soma térmica ($graus\ dias^{-1}$)	B	[1640 1640 1840]
	A	[1640 1840 1840]
Precipitação Pluviométrica (mm)	B	[650 650 750]
	A	[650 750 750]
Produtividade de Grãos ($kg\ ha^{-1}$)	MB	[934 934 1300]
	B	[1200 1500 1800]
	M	[1650 2250 2250]

MB = muito baixo; B = baixo; M = médio, A = alto.

Para a função de pertinência triangular, as doses de nitrogênio ($kg\ ha^{-1}$) foram consideradas até o domínio de intervalo [0 60], pelo fato de que com doses maiores de nitrogênio não se atingiu valores expressivos de produtividades. A classificação ocorreu nos seguintes intervalos: o domínio de intervalo [0 0 30] é classificado em muito baixo (MB), [15 35 50] classificado em baixo (B) e [42

60 60] classificado em médio (M). Para a soma térmica foi considerado o domínio de intervalo [1640 1640 1840] classificado em baixo (B) e [1640 1840 1840] classificado em alto (A). Já a precipitação pluviométrica foi considerado o intervalo [650 650 750] como baixo (B) e o intervalo [650 750 750] como alto (A). Para a variável de saída produtividade de grãos, o intervalo [934 934 1300] foi considerado muito baixo (MB), [1200 1500 1800] baixo (B) e [1650 2250 2250] médio (M).

A Tabela 3, apresenta a base de regras da lógica fuzzy para a simulação da produtividade de grãos de aveia, envolvendo as doses de nitrogênio, soma térmica e precipitação pluviométrica, construída junto com um especialista na cultura da aveia. A base de regras considerando a quantidade de variáveis de entrada e classes, foi formulada com 12 regras linguísticas.

Tabela 3: Base de regras para a simulação da produtividade de grãos no sistema de sucessão soja/aveia.

<i>n</i>	Dose de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	Soma térmica (graus dia ⁻¹)	Precipitação (mm)	Produtividade de Grãos (kg ha ⁻¹)
1	MB	B	B	MB
2	MB	A	B	MB
3	MB	B	A	MB
4	MB	A	A	MB
5	B	B	B	B
6	B	A	B	B
7	B	B	A	B
8	B	A	A	B
9	M	B	B	M
10	M	A	B	M
11	M	B	A	B
12	M	A	A	B

n = número de regras; MB = muito baixo; B = baixo; M = médio; A = alto; mm = milímetros.

Na Tabela 4, estão apresentados os dados observados por bioexperimentação e os dados simulados via lógica fuzzy, independente de fonte de nitrogênio. Na simulação da produtividade de grãos observou-se que os resultados obtidos não foram muito similares aos observados via bioexperimentação, apresentando valores de erro absoluto consideráveis. Entretanto, considerando a pequena base de regras utilizada na construção do modelo de lógica fuzzy junto a pouca quantidade de dados, os resultados são considerados satisfatórios.

Tabela 4: Lógica fuzzy na simulação da produtividade de grãos pelo nitrogênio, soma térmica e precipitação pluviométrica no sistema de cultivo soja/aveia.

Dose de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	Soma térmica (graus dia ⁻¹)	Precipitação (mm)	<i>PG_O</i> (kg ha ⁻¹)	<i>PG_S</i>	EA
0			1294	1070	224
20	1740	700	1480	1320	160
40			1618	1500	118
60			1714	1760	46

PG_O = produtividade de grãos observada; *PG_S* = produtividade de grãos simulada; EA = erro absoluto.

Neste sentido, a lógica fuzzy se apresenta como uma possibilidade de avanço em diversas áreas, trazendo grandes contribuições para diversos setores, como na agricultura. A lógica fuzzy vem sendo utilizada em diversas áreas, na secagem de grãos e aquecimento de aviários [15] desenvolveram um sistema fuzzy para simular o monitoramento da potência aplicada ao motor do sistema de ventilação de um gaseificador/combustor. Em trigo, [5] utilizando um modelo fuzzy simularam a produtividade biológica e grãos de trigo nas condições de uso de hidrogel, nitrogênio e temperatura máxima. Na cultura do rabanete [3] através da modelagem fuzzy estimaram o comportamento da

produtividade do rabanete afetada por diferentes lâminas de irrigação, com base na evapotranspiração da cultura, evidenciando que o modelo proposto foi satisfatório.

4 Conclusões

A função de pertinência e os valores linguísticos estabelecidos juntamente com a configuração da base de regras para as variáveis de entrada e de saída se mostram adequados para o uso da lógica fuzzy na simulação da produtividade de grãos de aveia.

O modelo de lógica fuzzy gerado possibilita simular valores satisfatórios para a produtividade de grãos de aveia pelo uso do nitrogênio e elementos meteorológicos.

Agradecimentos

Ao CNPq, à CAPES, à FAPERGS e à UNIJUÍ pelos recursos financeiros, estrutura física e materiais necessários para a realização da pesquisa.

Referências

- [1] R. L. J. Almeida et al. “Composição centesimal e comportamento reológico do extrato de aveia (*Avena sativa*)”. Em: **Research, Society and Development** 9 (2020), e31932329–e31932329. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2329>.
- [2] L. C. Barros e R. C. Bassanezi. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. 2a. ed. São Paulo: IMECC Textos didáticos, 2010.
- [3] A. C. M. R. Boso et al. “Fuzzy modeling of the effects of different irrigation depths on the radish crop. Part I: Productivity analysis”. Em: **Engenharia Agrícola** 41 (2021), pp. 311–318. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n3p311-318/2021>.
- [4] A. T. W. De Mamann et al. “Artificial intelligence simulating grain productivity during the wheat development considering biological and environmental indicators”. Em: **Journal of Agricultural Studies** 3 (2019), pp. 197–212. DOI: <https://doi.org/10.5296/jas.v7i3.15153>.
- [5] A. T. W. De Mamann et al. “Lógica fuzzy na simulação da produtividade de trigo por nitrogênio e hidrogel”. Em: **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics** (2018). DOI: <https://doi.org/10.5540/03.2018.006.01.0384>.
- [6] K. Fan et al. “Dynamics of nitrogen translocation from mature leaves to new shoots and related gene expression during spring shoots development in tea plants (*Camellia sinensis* L.)” Em: **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 2 (2020), pp. 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201900268>.
- [7] B. C. Góes et al. “Método de utilização do Fuzzy Logic Toolbox do software MATLAB para modelagem matemática de variáveis biométricas e nutricionais da cultura da soja”. Em: **Research, Society and Development** 9 (2020). DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8938>.
- [8] A. R. Kraisig et al. “Time of nitrogen supply in yield, industrial and chemical quality of oat grains”. Em: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 24 (2020), pp. 700–706. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n10p700-706>.
- [9] J. E. S. Lima et al. “Volatilização da amônia da ureia estabilizada com NBPT na adubação em cobertura da *Urochloa ruziziensis*”. Em: **Colloquium Agrariae**. 14. 2018, pp. 92–100.

- [10] M. Lovatto et al. “Crown rust on oat genotypes with different levels of resistance: damages and losses”. Em: **Ciência Rural** 51 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200298>.
- [11] C. S. Malaman e A. Amorim. “Método para determinação de valores na avaliação imobiliária: comparação entre o Modelo de Regressão Linear e Lógica Fuzzy”. Em: **Boletim de Ciências Geodésicas** 23 (2017), pp. 87–100. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702017000100006>.
- [12] R. D Mantai et al. “Technical and agronomic efficiency of nitrogen use on the yield and quality of oat grains”. Em: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 25 (2021), pp. 529–537. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p529-537>.
- [13] M. P. Moreti et al. “Inteligência Artificial no Agronegócio e os Desafios para a Proteção da Propriedade Intelectual”. Em: **Cadernos de Prospecção** 14 (2021), pp. 60–60. DOI: <http://dx.doi/10.9771/cp.v14i1.33098>.
- [14] A. M. Prando et al. “Características produtivas do trigo em função de fontes e doses de nitrogênio”. Em: **Pesquisa Agropecuária Tropical** 43 (2013), pp. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000100009>.
- [15] O. L. T. Rezende, L. L. Lorenzoni e H. R. Kulitz. “Uso do sistema lógico fuzzy no controle da potência aplicada ao motor do sistema de ventilação de um gaseificador/combustor para produção de calor”. Em: **Revista Ifes Ciência** 1 (2015), pp. 62–76. DOI: <https://doi.org/10.36524/ric.v1i1.237>.
- [16] C. A. Rosolem et al. “Absorção de ureia via foliar pelo algodoeiro em função do pH da solução”. Em: **Pesq. Agropec. Bras** 25 (1990), pp. 491–497.
- [17] F. C. Soares et al. “Predição da produtividade da cultura do milho utilizando rede neural artificial”. Em: **Ciência Rural** 45 (2015), pp. 1987–1993. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141524>.
- [18] F. Soltani et al. “Mathematical characterization of growth of a local landrace of sorghum from Saudi Arabia”. Em: **International Journal Pure Applied Bioscience** 6 (2018), pp. 52–55. DOI: [10.18782/2320-7051.6075](https://doi.org/10.18782/2320-7051.6075).
- [19] L. A. Zadeh. “Fuzzy sets”. Em: **Information and Control** 3 (1965), pp. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).