

Lógica Fuzzy na Previsão da Produtividade de Grãos de Aveia pelo Nitrogênio e Condições Meteorológicas

Juliana Aozane da Rosa,¹ Rubia Diana Mantai,² Cibele Luisa Peter,³ Natiane Carolina Ferrari Basso,⁴ Cristhian Milbradt Babeski,⁵ Lara Laís Schünemann,⁶ Ivan Ricardo Carvalho,⁷ José Antonio Gonzalez da Silva⁸
UNIJUÍ, IJUÍ, RS

Resumo. A modelagem matemática via lógica fuzzy tem permitido simular sistemas complexos de comportamentos lineares e não lineares e auxiliar na busca de soluções nas mais diversas áreas da ciência, com na agricultura. O emprego de lógica fuzzy pode permitir simulações e proposições mais precisas da produtividade dos grãos de espécies, em função de variáveis controladas e não controladas. A aveia branca é um cereal com destaque de seus derivados na alimentação humana e sua produtividade está associada com a adubação através do nitrogênio e as condições meteorológicas. O objetivo deste trabalho é empregar a lógica fuzzy para simular a produtividade de grãos de aveia aliado aos processos envolvendo variáveis meteorológicas não controláveis e considerando o uso do nitrogênio. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com 4 repetições, seguindo um esquema fatorial 4 x 2, com quatro doses de nitrogênio (0 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹, 60 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹) e duas cultivares (Barbarasul e Brisasul), no sistema de cultivo soja/aveia nos anos agrícolas de 2011 a 2016. No desenvolvimento da lógica fuzzy foi considerada a função de pertinência triangular e o método de inferência Mamdani. A lógica fuzzy mostra-se eficaz na simulação da produtividade de grãos de aveia em função das variáveis não controladas aliadas a doses de nitrogênio e se ajusta aos processos de biosistemas, representando inovação com potencialidade de uso na perspectiva de simulação, essencialmente em situações onde é necessário lidar com a incerteza e subjetividade, comuns na agricultura.

Palavras-chave. *Avena sativa L.*, modelagem matemática, simulação, nitrogênio

1 Introdução

A modelagem Matemática é um processo dinâmico muito utilizado em biosistemas para a obtenção e validação de modelos capazes de realizar previsões de produtividade, de diversas culturas [10, 13]. Dentre as ferramentas da modelagem matemática tem-se o uso da lógica fuzzy, que é caracterizada como um dos ramos da inteligência artificial [5, 9]. A lógica fuzzy é conhecida como sistemas de conjuntos nebulosos, que tem sido utilizada para tratar de problemas com características complexas, sendo capaz de capturar informações incertas, em geral, determinadas por expressões linguísticas, e convertê-las para um formato numérico de fácil manipulação, tornando-se solução para problemas até então não solucionáveis por técnicas clássicas [1, 14]. Na agricultura, a

¹juaozane@gmail.com

²rdmantai@yahoo.com.br

³cibele.peter@sou.unijui.edu.br

⁴natiane.basso@sou.unijui.edu.br

⁵cristhiancmb@hotmail.com

⁶laralaisschunemann@gmail.com

⁷ivan.carvalho@unijui.edu.br

⁸jose.gonzales@unijui.edu.br

lógica fuzzy é utilizada para resolver problemas complexos, como simular e quantificar os impactos ocasionados pela não linearidade dos elementos meteorológicos, auxiliando no monitoramento e na previsibilidade das safras em grandes áreas [3].

A aveia branca (*Avena Sativa L.*) é um cereal que vem se destacando no cenário agrícola brasileiro, pela grande demanda de seus derivados tanto na alimentação humana como animal [7, 12]. A sua produtividade está associada diretamente com as tecnologias de manejo e condições meteorológicas. Dentre as tecnologias de manejo, é essencial a adubação nitrogenada, sendo sua dose de fornecimento dependente do teor de matéria orgânica do solo, relação C/N da cultura antecessora e da produtividade desejada [8, 12]. A eficiência do nitrogênio pela planta é influenciada diretamente pelas condições meteorológicas, uma vez que se for aplicado com temperatura do ar elevada, com baixa umidade do solo ou elevada precipitação pluviométrica, comumente ocasionam perdas de nutriente, gerando sérios prejuízos econômicos e poluição ambiental [7, 8].

Neste contexto, há a necessidade de modelos que permitam a inclusão de parâmetros ligados à planta, envolvendo manejos e a não linearidade da precipitação pluviométrica e temperatura do ar. O emprego de lógica fuzzy pode permitir simulações e proposições mais precisas da produtividade dos grãos de aveia, em função de variáveis controladas e não controladas. Com isso, o objetivo deste trabalho é empregar a lógica fuzzy para simular a produtividade de grãos de aveia aliada aos processos envolvendo variáveis meteorológicas não controláveis, considerando o uso do nitrogênio.

2 Materiais e Métodos

O experimento foi conduzido em campo nos anos agrícolas de 2011 a 2016, em Augusto Pestana, RS, Brasil. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições, seguindo um esquema fatorial 4 x 2, para doses de nitrogênio (0, 30, 60 e 120 kg ha⁻¹) e cultivares de aveia (Barbarasul e Brisasul), totalizando 32 unidades experimentais no sistema de sucessão soja/aveia. A adubação nitrogenada ocorreu de forma única na condição de V₃/V₄, estágio fenológico de terceira e quarta folha expandida. A produtividade de grãos foi obtida pelo corte das três linhas centrais de cada parcela, quando as plantas atingiram a maturidade fisiológica, com umidade de grãos próxima a 22%. As amostras coletadas foram trilhadas em colheitadeira estacionária e direcionadas ao laboratório para correção da umidade de grãos para 13% e estimativa da produtividade de grãos em kg ha⁻¹. Os dados meteorológicos de temperatura do ar e precipitação pluviométrica para análise dos anos agrícolas foram obtidos através da estação meteorológica automática localizada a aproximadamente 200 metros do experimento.

Após a obtenção dos dados, foi aplicada análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 5%, a fim de identificar os efeitos principais e de interação. Visando a elaboração de modelos de simulação para a produtividade de grãos, utilizou-se um sistema baseado em regras fuzzy (SBRF), implementado pelo Toolbox Fuzz Logic do Matlab. Foi considerado para as variáveis linguísticas de entrada: temperatura mínima, temperatura máxima, precipitação pluviométrica, ano de cultivo e dose de nitrogênio, e para variável linguística de saída, a produtividade de grãos da cultura de aveia. A modelagem foi realizada pelo método de inferência de Mamdani, com emprego do conectivo “e” para avaliação das regras, funções de pertinência do tipo triangular, e defuzzificação pelo método do menor valor da função máxima de associação agregado. Para a formalização matemática de um conjunto fuzzy, Zadeh (1965)[14] mostrou 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 A , e com $X_A = 0$ indicando que o elemento X não pertence a A . Desta forma, a função característica é descrita por uma função sobrejetora.

Zadeh [14] 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 dada 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.

O sistema baseado em regras fuzzy é composto por quatro componentes: um processador de entrada que realiza a fuzzificação dos dados de entrada, um conjunto de regras nebulosas, denominada de base de regras, um módulo de inferência fuzzy e um processador de saída que defuzzifica o número fuzzy e fornece um número real como saída [6]. O processador de entrada ou módulo de fuzzificação, modela matematicamente as variáveis de entrada, sendo atribuídos para cada variável termos linguísticos que representam o estado desta variável, associado a um conjunto fuzzy por uma função de pertinência. Várias são as funções de pertinências, porém, os números fuzzy mais utilizados são os triangulares e trapezoidais.

Para simulação das variáveis de interesse pela programação fuzzy, foram utilizados no modelo os valores médios dos elementos meteorológicos por ano agrícola para cada dose de nitrogênio e sistema de sucessão avaliados. Com o auxílio de um engenheiro agrônomo com experiência na cultura da aveia foram determinados as classes e os intervalos de classe para cada variável de entrada e saída, assim como a base de regras que contempla a lógica de incertezas fuzzy. Para validação da base de regras e verificação da eficiência do modelo fuzzy foi considerado o comportamento das regressões obtidas pelos pontos observados e simulados junto à definição da máxima eficiência técnica de cultivo de cada polinômio quadrático. Além disso, foi considerado para comparação o desvio padrão dos dados observados com o erro absoluto dado pela diferença do valor observado com o simulado. Para determinação dos modelos de regressão e desvio padrão foram utilizados os programas computacionais Genes e Excel.

3 Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta as classes e os intervalos para cada variável de entrada e saída, que foram definidos com a ajuda de um profissional da área da agronomia, e que foram utilizados na base de regras da lógica fuzzy para a simulação da produtividade de grãos da aveia. Foi formulada uma base com 405 regras linguísticas para a variável de saída (dados não apresentados).

Para a temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), foi considerado o domínio de intervalo $[8, 12, 5]$; para a temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), considerou-se o domínio de intervalo $[21, 23, 5]$, e para a precipitação

Tabela 1: Classe das variáveis de entrada e saída utilizados na base de regras lógica fuzzy para a simulação da produtividade de grãos da aveia.

	V	Classe	Amplitude de Classe			V	Classe	Amplitude de Classe			
			V_{min}	Vértice	V_{max}			V_{min}	Vértice	V_{max}	
Variáveis de entrada	\bar{T}_{min}	B	8	8	10,2	Variáveis de entrada	MB	0	0	30	
		M	8	10,2	12,5		B	0	30	60	
		A	10,2	12,5	12,5		N	MD	30	60	90
	\bar{T}_{max}	B	21	21	22,2		A	60	90	120	
		M	21	22,2	23,5		MA	90	120	120	
		A	22,2	23,5	23,5		Variável de saída	MB	1000	1000	1400
	$\sum PP$	B	500	500	675			B	1000	1700	2100
		M	500	675	850			MA	1400	2100	2500
		A	675	850	850			PG	AC	2000	2550
Ano	AD	0	0	1	RA	2400		3150	3610		
	AI	0	1	2	A	3200		3700	4200		
	AF	1	2	2	E	3750		4250	4250		

V = variável; V_{min} = valor mínimo da forma triangular; V_{max} = valor máximo da forma triangular; \bar{T}_{min} = temperatura média mínima ($^{\circ}C$); \bar{T}_{max} = temperatura média máxima ($^{\circ}C$); $\sum PP$ = precipitação pluviométrica (mm); N= dose de nitrogênio ($kg\ ha^{-1}$); AD= ano desfavorável; AI= ano intermediário; AF= ano favorável; PG = produtividade de grãos ($kg\ ha^{-1}$); = baixa; M = média; MD = moderada; A= alta; MB = muito baixa; MA = moderadamente aceitável; AC = aceitável; RA = relativamente alta; E = excelente.

pluviométrica (mm), foi definido o domínio de intervalo [500, 850]. Estas três variáveis meteorológicas foram classificadas em baixa (B), média (M) e alta (A). Os anos de cultivos foram classificados em desfavorável (AD), intermediário (AI) e favorável (AF), codificando-os em 0, 1 e 2, respectivamente. Para as doses de adubação nitrogenada ($kg\ ha^{-1}$), foi considerado o domínio de intervalo [0, 120], que foram classificadas em muito baixa (MB), baixa (B), moderada (MD), alta (A) e muito alta (MA). Nas variáveis de saída, os intervalos de imagem representam o valor máximo e o mínimo dos dados coletados experimentalmente, considerando as médias dos anos de avaliação por categoria de ano favorável, desfavorável e intermediário. Portanto, para a produtividade de grãos ($kg\ ha^{-1}$) foi considerado o domínio de intervalo [1000, 4250] e que foi dividido em sete intervalos equidistantes, definidos em muito baixa (MB), baixa (B), moderadamente aceitável (MA), aceitável (AC), relativamente alta (RA), alta (A) e excelente (E).

A partir das médias de temperatura mínima e máxima, precipitação pluviométrica dos anos de cultivo e condição de adubação nitrogenada, são apresentados na Tabela 2, os valores da produtividade de grãos da aveia observados em campo e simulados pela lógica fuzzy em sistema soja/aveia.

Os anos de cultivos 2012 e 2014 foram classificados em desfavoráveis (AD); 2015 e 2016 como anos intermediários (AI); e 2011 e 2013 como anos favoráveis (AF) à produtividade de grãos. Destaca-se que os resultados da produtividade de grãos simulados mostraram-se muito próximos aos observados, com erros absolutos menores que o desvio padrão dos dados observados. Estas condições sugerem que as funções de pertinência e valores linguísticos para simulação foram adequadas para o processo de fuzzificação, indicando a capacidade de reconhecimento de processos biológicos pela teoria dos conjuntos via lógica fuzzy. Desta forma, o modelo de fuzzificação representa uma inovação com potencialidade de uso para simulação da produtividade de grãos de aveia a partir de informações do manejo do nitrogênio com as condições meteorológicas dos anos de cultivo.

A modelagem matemática e as técnicas de processamento de dados e simulação, como a lógica fuzzy, estão sendo utilizadas para explicar o desenvolvimento de sistemas complexos na agricultura. No trigo foi realizada a modelagem de combinação fuzzy de índice de vegetação por sensoriamento remoto na análise da safra da cultura, sendo concluído que a técnica pode apoiar o desenvolvimento

Tabela 2: Lógica Fuzzy na simulação da produtividade de grãos da aveia pelo nitrogênio, temperaturas média e precipitação pluviométrica no sistema soja/aveia.

Ano	T_{med} (°C)		$\sum PP$ (mm)	Dose N (kg ha^{-1})	V_O (kg ha^{-1})	DP (kg ha^{-1})	V_S (kg ha^{-1})	EA (kg ha^{-1})
	\bar{T}_{mim}	\bar{T}_{max}						
Produtividade de Grãos U=(176 kg)								
2011 (AF)	10,1	22,4	767	0	2989	183	3050	64
				30	3694	197	3630	61
				60	4124	438	4090	34
				120	3938	345	4090	152
2012 (AD)	11,5	22,2	698	0	1745	148	1750	5
				30	2361	167	2240	121
				60	2751	66	2690	61
				120	2654	150	2690	36
2013 (AF)	8,7	21,2	510	0	3036	174	3180	144
				30	3721	238	3700	21
				60	4174	263	4150	24
				120	3994	212	4150	156
2014 (AD)	11,9	22,9	844	0	1645	179	1720	75
				30	2132	168	2240	108
				60	2426	220	2240	186
				120	2522	159	2660	138
2015 (AI)	12,3	22,0	651	0	2746	164	2820	74
				30	3361	260	3240	80
				60	3825	248	3760	65
				120	3871	322	3760	111
2016 (AI)	9,9	23,5	625	0	2461	180	2300	161
				30	3279	223	3180	99
				60	3884	229	3730	154
				120	3717	232	3730	13

\bar{T}_{med} = Temperatura média (°C); \bar{T}_{mim} = temperatura média mínima; \bar{T}_{max} = temperatura média máxima; $\sum PP$ = precipitação pluviométrica; N = dose de nitrogênio; V_O = valor observado; V_S = valor simulado pela lógica fuzzy; EA = erro absoluto; DP = desvio padrão do valor observado; AD = ano desfavorável; AI = ano intermediário; AF = ano favorável.

de ferramentas para estimar o desempenho do cereal [11]. Também com trigo, foi utilizado um modelo fuzzy para estimar os valores de produtividade de biomassa e grãos de trigo pelo nitrogênio e não linearidade da temperatura máxima do ar nas condições de uso do biopolímero hidrogel [4].

Na Figura 1 são apresentados os gráficos gerados a partir das equações de regressão quadráticas obtidas, considerando os dados reais e os dados simulados pela lógica fuzzy. É possível observar o comportamento da produtividade de grãos em função da dose de nitrogênio aplicada, bem como, a máxima eficiência técnica no uso de nitrogênio, na comparação entre os dados reais e os dados simulados. As equações desenvolvidas em ambos os casos apresentam comportamento quadrático, inclusive com parâmetros similares entre as equações.

De forma geral, a máxima eficiência técnica dos dados simulados e observados se mostram próximas. Nos anos favoráveis ao cultivo, 2011 e 2013, obteve-se uma diferença de apenas 8 kg ha^{-1} de nitrogênio. No ano de 2012, desfavorável ao cultivo, também houve uma diferença de apenas 8 kg ha^{-1} de nitrogênio. Entretanto, no ano de 2014, também desfavorável, a máxima eficiência técnica simulada obteve um resultado mais elevado que o esperado, com uma diferença de 45 kg ha^{-1} . Em 2015 e 2016, anos intermediários ao cultivo, a diferença entre a máxima eficiência técnica esperada e a simulada é de apenas 6 kg ha^{-1} e 3 kg ha^{-1} de nitrogênio, respectivamente.

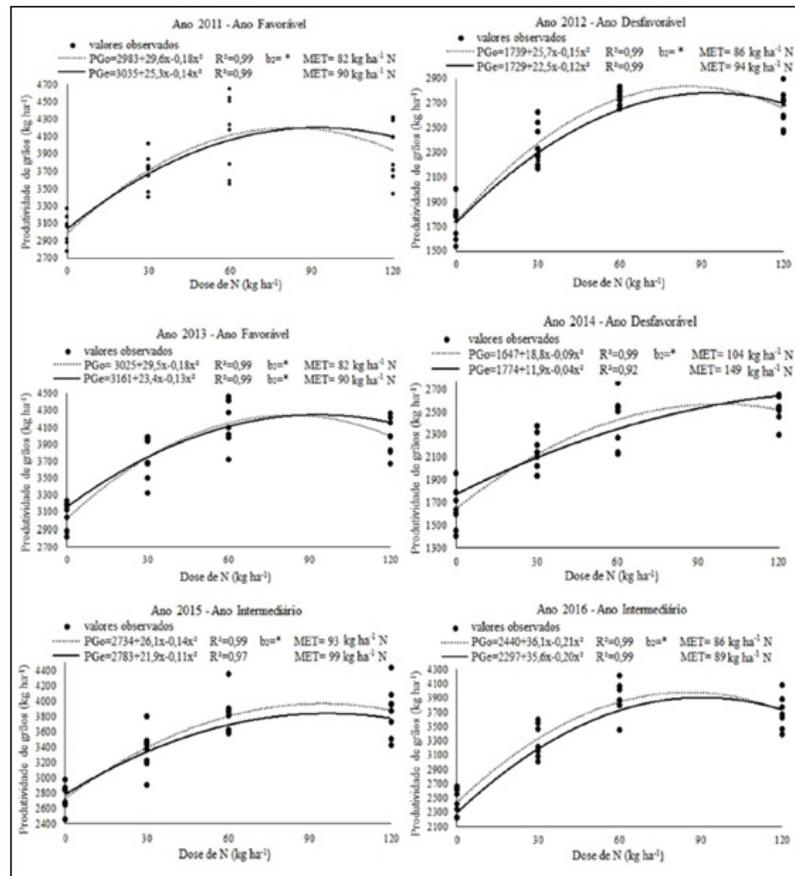


Figura 1: Comportamento da produtividade de grãos de aveia a partir de dados observados e estimados pela lógica fuzzy, em sistema soja/aveia.

Destaca-se como exemplo o ano favorável ao cultivo, em que a maior produtividade de grãos é alcançada com 82 kg ha⁻¹ de nitrogênio na condição real de cultivo, e 90 kg ha⁻¹ de nitrogênio na condição simulada. Estas condições, validam o uso da programação realizada pela interpretação de dados linguísticos na previsibilidade da produtividade de grãos de aveia em sistema soja/aveia.

4 Conclusões

A lógica fuzzy simula com eficiência a produtividade de grãos pelas variáveis não controladas aliadas as doses de nitrogênio em cobertura. O modelo fuzzy se adequa aos processos de biosistemas, representando inovação com potencialidade de uso na perspectiva de simulação, principalmente em ambientes onde é necessário lidar com a incerteza e subjetividade, condição comum na agricultura na busca da previsibilidade de safras.

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] G. Bannerjee et al. “Artificial intelligence in agriculture: A literature survey”. Em: **International Journal of Scientific Research in Computer Science Applications and Management Studies** 3 (2018), pp. 1–6.
- [2] L. C. Barros e R. C. Bassanezi. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. 2a. ed. São Paulo: IMECC Textos didáticos, 2010.
- [3] J. S. P. Costa et al. “Single and split nitrogen dose in wheat yield indicators”. Em: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 22 (2018), pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p16-21>.
- [4] A. T. W. De Mamann et al. “Diffuse system simulating wheat productivity by nitrogen and temperature in the use of biopolymers”. Em: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 24 (2020), pp. 289–297. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n5p289-297>.
- [5] F. O. Godoy et al. “Utilização da lógica fuzzy aplicada à energia solar”. Em: **Cadernos de Ciência & Tecnologia** 2 (2020), p. 26663.
- [6] R. M. Jafelice, L. C. de Barros e R. C. Bassanezi. “Teoria dos Conjuntos Fuzzy com aplicações”. Em: **Notas em Matemática Aplicada** 17 (2012), p. 119.
- [7] R. D. Mantai et al. “Contribution of nitrogen on industrial quality of oat grain components and the dynamics of relations with yield”. Em: **Australian Journal of Crop Science** 15 (2021). DOI: [10.21475/ajcs.21.15.03.p2592](https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.03.p2592).
- [8] A. Marolli et al. “A simulação da biomassa de aveia por elementos climáticos, nitrogênio e regulador de crescimento”. Em: **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia** 70 (2018), pp. 535–544. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9504>.
- [9] A. A. Marro et al. “Lógica fuzzy: conceitos e aplicações”. Em: **Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)** (2010), p. 2.
- [10] O. B. Scremin et al. “Nitrogen and hydrogel combination in oat grains productivity”. Em: **International Journal of Development Research** 7.7 (2017), pp. 13896–13903.
- [11] T. Semeraro et al. “Modelling fuzzy combination of remote sensing vegetation index for durum wheat crop analysis”. Em: **Computers and Electronics in Agriculture** 156 (2019), pp. 684–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.027>.
- [12] J. A. G. da Silva et al. “Nitrogen efficiency in oats on grain yield with stability”. Em: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 20 (2016), pp. 1095–1100. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n12p1095-1100>.
- [13] F. Soltani et al. “Mathematical characterization of growth of a local landrace of sorghum from Saudi Arabia”. Em: **International Journal Pure Applied Bioscience** 1 (2018), pp. 52–55. DOI: <http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.6075>.
- [14] 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).