

permite compreender alterações na geometria externa, na seção transversal e na microestrutura dos extrusados (Salvador-Reyes et al., 2023).

Apesar do avanço nas pesquisas com milho roxo, as informações que correlacionam condições térmicas e teores de umidade com a morfometria e a microestrutura desses produtos permanecem escassas. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o impacto da condição térmica e da umidade de alimentação na firmeza, morfologia e características microestruturais de extrusados de farinha de milho roxo peruano cv. INIA-60.

MATERIAL E MÉTODOS

Procedimento experimental. Grãos de milho roxo (*Zea mays* L.), cv. INIA-601, adquiridos em Cajamarca, Peru, foram armazenados sob refrigeração e protegidos da luz. A farinha, com umidade inicial de 10,7%, foi acondicionada aos níveis estabelecidos e extrusada em extrusora dupla rosca co-rotante ZSK-30 (Werner & Pfleiderer, Alemanha), com matriz de 4,8 mm e rotação de 170–200 rpm. O delineamento foi fatorial 2×3 , combinando condição térmica suave (60–70–90–100 °C) e forte (80–90–120–140 °C) com umidades de 22, 26 e 30%, originando os tratamentos S22, S26, S30, F22, F26 e F30. Os extrusados foram secos a 100 °C por 30 min no estufa de circulação e acondicionados para posteriores análises.

Análise de textura instrumental. A firmeza dos extrusados foi avaliada em analisador de textura TA.XTplus (Stable Micro Systems, Godalming, Reino Unido), equipado com acessório de corte tipo Warner-Bratzler, conforme Paula e Conti-Silva (2014), com modificações. As amostras foram posicionadas transversalmente e submetidas ao ensaio de corte no modo compressão (velocidade de 2,0 mm s⁻¹; distância de 30 mm; n=15), definindo-se a firmeza como o pico máximo de força (g) da curva força-tempo.

Análise de imagem. A morfologia dos extrusados inteiros e das seções transversais foi avaliada por imagens digitais no software FIJI/ImageJ (Schindelin et al., 2012). As imagens foram obtidas sob iluminação padronizada e escala métrica. Após calibração e segmentação por limiarização (thresholding), determinaram-se a área projetada, área transversal, MinFerret e solidez (n = 15).

Índice de expansão seccional (IES). O IES foi estimado a partir da área transversal obtida por análise de imagem. Para isso, calculou-se o diâmetro equivalente da seção transversal (D_{eq} , mm) considerando que A é a área transversal dos extrusados (mm²) e, posteriormente, a relação entre D_{eq} e o diâmetro da matriz da extrusora ($D_0=4,8$ mm), conforme as Equações 1 e 2:

$$D_{eq} = 2 \frac{\sqrt{A}}{\pi} \quad (1) \quad ; \quad IES = \left(\frac{D_{eq}^2}{D_0} \right) \quad (2)$$

Microscopia óptica. A microestrutura aparente dos extrusados foi avaliada qualitativamente em microscópio Olympus BX51/BX52 (Olympus, Tóquio, Japão), equipado com câmera digital Canon PowerShot A620, 7,1 megapixels (Canon, Tochigi, Japão). As imagens foram obtidas com aumento de 20×, sob iluminação LED e luz polarizada, para observação da organização interna aparente, espaços internos visuais e compactação estrutural dos extrusados.

Análise estatística. Os dados foram submetidos à ANOVA bifatorial, considerando os efeitos da condição térmica, da umidade de alimentação e de sua interação. Os pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias foram verificados pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando o software Jamovi, versão 2.6.44.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de firmeza, área projetada, IES e MinFerret transversal encontram-se na Tabela 1. A firmeza foi significativamente influenciada pela condição térmica, umidade de alimentação e

interação entre esses fatores ($p < 0,05$). O tratamento S26 apresentou a maior firmeza, seguido de S30, enquanto F22, F26, F30 e S22 apresentaram menores valores. Esse comportamento sugere que, sob condição térmica suave, o aumento da umidade até 26% favoreceu a formação de uma matriz mais compacta e resistente.

Tabela 1 – Propriedades texturais e morfométricas dos extrusados de milho roxo obtidas por análise instrumental e processamento de imagens.

Tratamento	Firmeza (g)	Área projetada (mm ²)	IES estimado	MinFeret transversal (mm)
S22	4547.94 ± 1716.15 ^c	213.12 ± 26.78 ^b	2.947 ± 0.388 ^b	7.90 ± 0.53 ^b
S26	11348.42 ± 4220.87 ^a	182.92 ± 13.17 ^c	2.731 ± 0.297 ^{bc}	7.44 ± 0.41 ^{bc}
S30	8187.93 ± 1903.44 ^b	152.47 ± 19.62 ^d	2.387 ± 0.253 ^c	6.97 ± 0.41 ^c
F22	4106.23 ± 470.97 ^c	240.02 ± 26.60 ^a	3.837 ± 0.369 ^a	9.07 ± 0.46 ^a
F26	4540.54 ± 611.77 ^c	165.46 ± 19.85 ^{cd}	2.917 ± 0.376 ^b	7.62 ± 0.51 ^b
F30	4017.36 ± 519.41 ^c	180.74 ± 20.51 ^c	2.999 ± 0.479 ^b	7.89 ± 0.63 ^b

Os resultados são expressos como média ± desvio-padrão. Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). IES: índice de expansão da seção, estimado a partir da área transversal obtida por análise de imagem, considerando o diâmetro da matriz de 4,8 mm.

A morfometria evidenciou diferenças entre os tratamentos. O F22 apresentou maior área projetada, IES e MinFeret transversal, indicando maior expansão radial. Encuanto, S30 apresentou os menores valores, sugerindo expansão limitada e compactação estrutural. Essa correlação inversa entre expansão e firmeza corrobora aos estudos realizados sobre milhos pigmentados, nos quais as variáveis de extrusão modularam a microestrutura e as propriedades tecnológicas (Salvador-Reyes et al., 2023; Pejcz et al., 2025).

A análise integrada demonstra que extrusados com acentuada expansão transversal tendem a uma menor firmeza, conforme observado em F22. Por outro lado, S26 e S30 apresentaram maior resistência mecânica e menores dimensões transversais, sugerindo estruturas mais compactas e resistentes à ruptura. As micrografias ópticas (Figura 1) complementaram esses resultados, evidenciando uma organização interna heterogênea em F22 e uma estrutura visualmente mais compacta em S26 e S30.

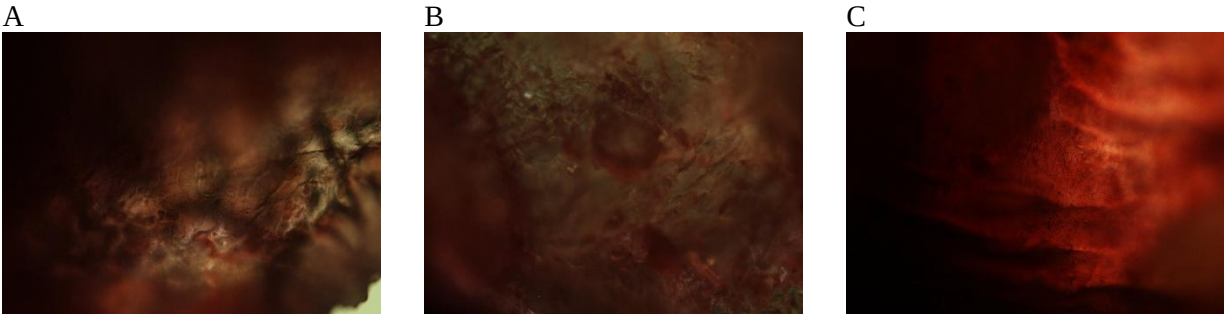


Figura 1 – Micrografias ópticas representativas da estrutura interna dos extrusados de milho roxo sob aumento de 20×: (A) F22, (B) S26 e (C) S30.

CONCLUSÕES

As condições de extrusão exerceram influência significativa sobre as propriedades texturais e morfométricas dos extrusados de milho roxo. O tratamento F22 apresentou maior expansão transversal e menor firmeza, enquanto S26 e S30 apresentaram elevada resistência

mecânica, associada a menores dimensões transversais e possível compactação estrutural. A combinação entre textura instrumental, análise de imagem e microscopia óptica permitiu relacionar a expansão, a organização interna aparente e a resposta mecânica dos extrusados. Tais achados ratificam o potencial da farinha de milho roxo peruano (cv. INIA-601) para o desenvolvimento de produtos expandidos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação Tecnológica (CONCYTEC) e ao Programa Nacional de Pesquisa Científica e Estudos Avançados (PROCIENCIA), pelo apoio concedido nos processos PE501089848–2024 e PE501084298–2023. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, processo nº 88887.829982/2023-00, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos nº 140834/2023-0 e nº 312660/2023-5. Ao Laboratório de Cereais, Raízes e Tubérculos II, da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pelo suporte ao desenvolvimento experimental deste estudo. Ao Ângelo Roberto Biasi, pelo auxílio técnico e apoio durante a etapa de extrusão.

REFERÊNCIAS

BHUSHAN, B.; KUMAR, S.; KAUR, C.; DEVI, V.; CHAUDHARY, D. P.; SINGH, A.; DAGLA, M. C.; KARJAGI, C. G.; SALEENA, L. A. K.; CHANDRAN, D.; KUMAR, M. Beyond colors: the health benefits of maize anthocyanins. *Applied Food Research*, v. 4, n. 1, p. 100399, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100399>.

PAULA, A. M.; CONTI-SILVA, A. C. Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, v. 121, p. 9–14, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.007>.

PEJCZ, E.; TIUPOVA, A.; WOJCIECHOWICZ-BUDZISZ, A.; LACHOWICZ-WIŚNIEWSKA, S.; WIŚNIEWSKI, R.; HARASYM, J. A structure-function related changes in rheological properties of pigmented corn after low temperature extrusion. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 104, p. 104145, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104145>.

REYES-PAVÓN, D.; SOTO-SIGALA, K. S.; CANO-SAMPEDRO, E.; MÉNDEZ-TRUJILLO, V.; NAVARRO-IBARRA, M. J.; PÉREZ-PASTEN-BORJA, R.; OLVERA-SANDOVAL, C.; TORRES-MARAVILLA, E. Pigmented native maize: unlocking the potential of anthocyanins and bioactive compounds from traditional to functional beverages. *Beverages*, v. 10, n. 3, p. 69, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/beverages10030069>.

SALVADOR-REYES, R.; SAMPAIO, U. M.; MORO, T. M. A.; BRITO, A. C.; BEHRENS, J.; CAMPELO, P. H.; CLERICI, M. T. P. S. Andean purple maize to produce extruded breakfast cereals: impact on techno-functional properties and sensory acceptance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 103, n. 2, p. 548–559, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.12165>.

SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I.; FRISE, E. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, v. 9, p. 676–682, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>.

XIAO, H.; WANG, S.; XU, W.; YIN, Y.; XU, D.; ZHANG, L.; LIU, G.-Q.; LUO, F.; SUN, S.; LIN, Q.; XU, B. The study on starch granules by using darkfield and polarized light microscopy. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 92, p. 103576, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103576>.