

AVALIAÇÃO DO TEOR DOS METAIS EM AMOSTRAS DE FEIJÕES COMERCIALIZADAS NO SUDOESTE DA BAHIA USANDO TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTIVARIADA

Clinzen F. Cletche¹, Geovane S. Oliveira¹, Eduarda V. Cunha¹, Marcella P. D. Girolamo¹, Jacqueline P. Conteiras¹, Josiane B. Santos¹, Nuno Avelar Nascimento², Erik G. P. Silva², Marcos A. Bezerra¹

¹*Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB – Campus de Jequié/Ba – Av. José Moreira Sobrinho S/N, Jequié, Bahia 45208-091, Brasil*

²*Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC - Campus Soane Nazaré de Andrade, Km 16- BR-415, Ilhéus, Bahia 45662-900, Brasil*

clinzenlopescletche@gmail.com

Palavras-Chave: Metais, Feijões, PCA e KSOMs

Introdução

O feijão é um alimento fundamental na dieta do brasileiro, destacando-se por fornecer nutrientes essenciais como proteínas de alta qualidade, minerais (ferro, cálcio, magnésio, zinco), vitaminas do complexo B, carboidratos complexos e fibras dietéticas, que auxiliam na saúde intestinal e no controle glicêmico. Além disso, é a principal fonte de proteínas para populações de baixa renda, sendo relevante do ponto de vista nutricional, econômico e social no Brasil. O consumo regular de feijão está associado a benefícios importantes para a saúde, incluindo a redução do risco de doenças cardiovasculares, diabetes, câncer de cólon e melhora nos níveis de colesterol [1, 2, 3].

Contudo, apesar de seu valor nutricional, o feijão pode acumular metais potencialmente tóxicos provenientes do ambiente, tais como solo contaminado, água de irrigação, fertilizantes, pesticidas e processos industriais ou de armazenamento. A ingestão prolongada desses metais acima dos limites seguros pode causar efeitos adversos à saúde humana, como neurotoxicidade e comprometimento renal. Por isso, é essencial monitorar os níveis de metais em alimentos amplamente consumidos [4, 5].

Para análise confiável desses elementos, a espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS) é amplamente utilizada por sua seletividade, precisão e precisão na determinação de metais em matrizes alimentares. Frente a complexidade e volume dos dados gerados, ferramentas estatísticas multivariadas como a Análise de Componentes Principais (PCA) e mapas auto-organizáveis de Kohonen oferecem recursos eficazes para revelar padrões latentes, reduzir a dimensionalidade dos dados e facilitar a sua interpretação. Essas técnicas já foram aplicadas com sucesso na caracterização, autenticação e exploração de dados de diversos alimentos [6, 7].

Assim, este estudo tem como objetivo avaliar os teores de metais em amostras de feijão comercializadas no município de Jequié (Bahia), utilizando técnicas multivariadas para analisar a distribuição, correlação e classificação das amostras conforme sua composição mineral. O trabalho pretende contribuir para a segurança alimentar, controle de qualidade e rastreabilidade do feijão consumido na região.

Material e Métodos

As amostras de feijões, comerciais no município de Jequié, Bahia, foram selecionadas em 23 marcas (industrializadas), uma sem marca, verdes (*in natura*) distintas e 7 tipos: 3 verdes (andu, feijão-de-corda e mangalô) e 4 industrializadas (branco, carioca, fradinho e preto) totalizando 38 amostras. Após aquisição, as amostras foram secadas em uma estufa de esterilização (SL 100 - Estufa de Secagem e Esterilização - Solab), posteriormente foram trituradas em um liquidificador (Philips Walita Daily RI2110) e peneiradas em malha de 100 µm, armazenadas em frascos de polietileno previamente descontaminados sem a necessidade de refrigeração.

A decomposição ácida das amostras foi realizada em sistema aberto em bloco digestor. Para isso, aproximadamente 0,5 g da amostra foi pesada em tubo digestor de vidro, seguido da adição de 2,0 mL de HNO₃ (concentrado) e 1,0 mL de H₂O₂ (30%). O sistema foi aquecido a 110 °C até quase secagem da amostra, com adição de água ultrapura para evitar secagem completa e garantir completa digestão. O digerido foi transferido para tubos Falcon volumétrico de 15,0 mL e completado com água ultrapura.

A determinação dos metais Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Zn, nas soluções finais foi realizada por FAAS e Na e K por FAES, utilizando um espectrômetro Perkin Elmer Analyst 200 equipado com lâmpada de deutério para correção de fundo e lâmpadas de cátodo oco específicas para cada elemento. Os comprimentos de onda adotados foram: Ca (422,7 nm), Cu (324,7 nm), Fe (248,3 nm), K (766,5 nm), Mg (285,8 nm), Na (589,0 nm) e Zn (213,9 nm). As condições da chama foram acetileno e ar, com fluxos de 2,0 L min⁻¹ e 13,5 L min⁻¹, respectivamente. O nebulizador operou com fluxo de 5,0 mL min⁻¹.

As características analíticas para a determinação dos oito metais envolvidos neste estudo foram verificadas. Os limites de detecção (LOD) e de quantificação (LOQ), são apresentadas na Tabela 1. O método proposto apresentou parâmetros de méritos adequados para a determinação dos metais.

Tabela 1. Limites de detecção (LOD) e quantificação (LOQ) para os metais analisados.

Metal	LOD mg·kg ⁻¹	LOQ mg·kg ⁻¹
Ca	0,57	1,71
Cu	0,00056	0,0017
Fe	0,0022	0,0068
Mg	0,0038	0,012
Mn	0,0049	0,015
Zn	0,0066	0,0201
Na	0,19	0,57
K	0,079	0,16

Para tratamento e interpretação dos dados obtidos, aplicaram-se técnicas de análise estatística multivariada, incluindo Análise de Componentes Principais (PCA) e Mapas Auto-organizáveis de Kohonen (KSOMs). A matriz de dados consistiu de 38 amostras por 8 variáveis (teores dos metais). Antes das análises, a matriz foi autorregulada (self-scaled). A análise PCA foi conduzida utilizando o software Statistica 12.0, enquanto os SOMs foram implementados via Matlab R2016a com toolbox especializado. As técnicas multivariadas classificaram os

feijões em grupos distintos conforme o perfil mineral, revelando a influência do tipo e da marca. Este protocolo metodológico garantiu precisão na determinação mineral dos feijões e uso eficiente de estatísticas para tratar dados complexos.

Resultados e Discussão

Após a validação da metodologia analítica, a análise do conteúdo mineral em 38 amostras de feijões comercializados evidenciou variações significativas nas concentrações de oito metais essenciais: Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Zn, Na e K, conforme apresentados na Tabela 2. A análise de variância (ANOVA) confirmou diferenças estatisticamente significativas entre as amostras, ressaltando a heterogeneidade mineral entre diferentes tipos e marcas de feijões.

Os resultados mostram que o feijão branco apresentou as maiores concentrações médias de ferro ($0,1259 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cu ($0,0369 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) e Na ($5302 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), o feijão andu destacou-se pelo maior teor de Zn ($0,7067 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) e Mg ($1,0721 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) enquanto o feijão mangalô registrou os valores mais elevados para Mn ($0,0889 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). O feijão fradinho apresentou maior nível de K ($30618 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Tabela 2 Concentração de metais (mg.kg⁻¹) em amostras de feijões a) verdes e b) industrializadas, comercializadas no município de Jequié (Bahia) após a aplicação do procedimento de decomposição do bloco de digestão e determinação por espectrometria atômica na chama (FAAS e FAES)

a)

Tipo de Feijão	Nº	Código	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	K	Mg	Na
Andu	1	A1	3,7 ± 0,3	11,4 ± 1,9	5,5 ± 0,1	12,9 ± 6,3	103,6 ± 5,4	10645,4 ± 721,7	106,7 ± 37,4	31,6 ± 4,0
	2	A2	3,5 ± 0,2	10,8 ± 2,6	2,7 ± 0,2	12,5 ± 1,7	122,7 ± 15,4	10881,6 ± 1126,7	213,4 ± 166,9	26,8 ± 7,0
	3	A3	2,8 ± 0,3	12,6 ± 0,7	5,0 ± 0,6	10,6 ± 1,1	112,6 ± 3,2	10661,7 ± 244,2	177,9 ± 6,7	31,1 ± 8,8
	4	A4	1,3 ± 0,2	15,2 ± 1,7	2,8 ± 0,5	16,6 ± 0,8	121,4 ± 4,9	12706,1 ± 149,0	231,4 ± 143,3	28,0 ± 3,5
	5	A5	3,93 ± 0,04	11,7 ± 0,5	3,2 ± 0,1	11,0 ± 0,1	133,8 ± 3,7	11228,4 ± 238,4	167,0 ± 31,8	33,0 ± 4,7
Corda	6	Co1	6,4 ± 0,6	14,4 ± 5,6	5,4 ± 0,3	15,0 ± 0,5	111,0 ± 2,3	10237,4 ± 172,5	184,4 ± 39,7	37,6 ± 0,5
	7	Co2	2,1 ± 0,3	14,5 ± 3,9	2,4 ± 0,3	8,8 ± 2,5	71,3 ± 3,2	6258,1 ± 185,7	44,6 ± 11,9	21,9 ± 2,0
	8	Co3	1,8 ± 0,1	20,8 ± 1,6	8,4 ± 0,3	15,1 ± 0,8	150,1 ± 8,0	10996,8 ± 218,4	202,5 ± 4,6	48,4 ± 1,9
	9	Co4	2,0 ± 0,4	17,9 ± 0,7	4,1 ± 0,3	11,5 ± 0,8	118,7 ± 1,1	8852,3 ± 208,1	205,4 ± 17,4	34,4 ± 1,1
	10	Co5	1,9 ± 1	10,2 ± 6,1	5,2 ± 2,1	12,3 ± 0,2	85,0 ± 4,5	9145,1 ± 354,3	47,3 ± 19,4	38,2 ± 3,5
Mangalô	11	M1	1,0 ± 0,3	8,3 ± 3,6	3,6 ± 1,7	5,1 ± 3,1	32,7 ± 6,5	8321,5 ± 1504,9	63,2 ± 49,3	63,4 ± 1,0
	12	M2	1,5 ± 0,4	11,4 ± 1,5	6,4 ± 0,3	7,1 ± 0,5	52,0 ± 3,3	6821,6 ± 311,3	28,7 ± 17,7	49,6 ± 3,2
	13	M3	1,8 ± 0,1	16 ± 4,1	6,6 ± 2,0	8,7 ± 0,2	81,1 ± 2,2	9726,5 ± 314,6	152,0 ± 21,3	23,6 ± 1,9
	14	M4	2 ± 1	7,9 ± 3,4	3,9 ± 1,2	7,1 ± 1,5	43,3 ± 0,7	7003,9 ± 219,5	28,3 ± 10,4	58,2 ± 3,4
	15	M5	1,7 ± 0,7	10,0 ± 3,9	3,9 ± 1,7	7,4 ± 2,1	34,9 ± 2,6	7343,0 ± 128,4	34,8 ± 13,7	11,7 ± 0,3
Média			2,5	12,9	4,6	10,8	91,6	9388,6	104,80	35,8
Desvio padrão			0,4	2,8	0,8	1,5	4,5	406,5	39,4	3,1

b)

Tipo de Feijão	Nº	Código	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	K	Mg	Na
Preto	1	P1	1,5 ± 0,9	10,0 ± 4,7	2,3 ± 0,3	5,9 ± 0,3	83,1 ± 1,1	7022,8 ± 39,5	8,4 ± 1,2	11,2 ± 0,5
	2	P2	1,4 ± 0,3	10,4 ± 3,3	1,8 ± 0,8	3,8 ± 0,3	82,0 ± 2,5	6500,6 ± 270,1	35,9 ± 5,2	10,2 ± 1,2
	3	P3	2,1 ± 0,2	17,6 ± 0,9	3,02 ± 0,3	7,7 ± 0,5	98,0 ± 3,4	7555,7 ± 1867,2	38,6 ± 3,3	15,1 ± 3,4
	4	P4	1,3 ± 0,1	16,3 ± 3,6	2,9 ± 0,4	8,9 ± 0,6	111,2 ± 1,6	10522,7 ± 87,4	95,4 ± 6,2	29,0 ± 1,5
	5	P5	1,8 ± 0,0	20,8 ± 0,4	3,6 ± 0,8	11,7 ± 0,8	127,5 ± 3,9	9716,5 ± 178,0	76,7 ± 5,7	22,5 ± 8,8
	6	C1	1,3 ± 0,1	19,7 ± 1,5	3,4 ± 0,2	11,4 ± 1,0	103,7 ± 3,1	11100,7 ± 401,2	88,3 ± 4,7	49,3 ± 2,5
Carioca	7	C2	2,2 ± 0,2	16,7 ± 3,4	3,8 ± 0,4	10,1 ± 0,3	109,7 ± 10,9	11855,9 ± 482,4	166,9 ± 6,1	35,3 ± 2,1
	8	C3	2,6 ± 0	18,5 ± 0,8	4,3 ± 0,1	11,0 ± 0,4	139,8 ± 3,2	11577,8 ± 1226,9	127,1 ± 1,4	26,3 ± 0,7
	9	C4	2,5 ± 0,1	19,7 ± 0,9	4,2 ± 0,2	7,8 ± 0,5	96,1 ± 2,8	12535,4 ± 333,3	109,1 ± 14,7	32,9 ± 1,4
	10	C5	1,3 ± 0,4	16,0 ± 3,2	2,2 ± 1,5	8,5 ± 0,7	92,4 ± 2,4	9507,1 ± 149,0	148,1 ± 3,0	26,2 ± 0,4
	11	C6	0,8 ± 0,2	15,1 ± 3,0	2,6 ± 0,7	5,4 ± 0,6	81,6 ± 1,8	12470,4 ± 77,2	92,9 ± 6,3	24,1 ± 0,1
	12	B1	2,9 ± 0,6	25,5 ± 2,2	5,2 ± 0,7	11,9 ± 0,3	103,7 ± 3,1	11100,7 ± 172,4	152,7 ± 9,0	55,1 ± 2,1
Branco	13	B2	3,8 ± 0,7	21,5 ± 0,3	4,8 ± 0,6	11,8 ± 0,3	99,9 ± 1,2	10079,8 ± 288,3	179,9 ± 3,0	54,4 ± 3,1
	14	B3	3,2 ± 0,3	25,9 ± 1,5	5,4 ± 0,2	12,6 ± 0,6	104,7 ± 16,5	10834,8 ± 118,6	140,3 ± 3,3	70,1 ± 2,4
	15	B4	2,5 ± 0,1	28,5 ± 0,9	4,9 ± 0,8	8,4 ± 0,4	112,8 ± 3,7	10137,8 ± 329,7	154,3 ± 19,8	83,0 ± 2,3
	16	B5	2,6 ± 0,4	18,3 ± 2,6	4,5 ± 0,9	12,5 ± 0,6	85,0 ± 4,4	10837,7 ± 340,5	95,7 ± 12,4	39,3 ± 1,8
	17	B6	3,4 ± 0,1	25,1 ± 0,4	6,0 ± 0,5	11,9 ± 0,3	122,1 ± 3,4	9708,5 ± 112,9	190,3 ± 35,8	62,0 ± 6,7
	18	F1	1,4 ± 0,1	14,4 ± 11,0	5,4 ± 0,6	14,3 ± 0,6	110,8 ± 5,5	10332,1 ± 130,2	214,1 ± 8,0	64,5 ± 1,9
Fradinho	19	F2	1,5 ± 0,3	16,7 ± 4,1	4,8 ± 1,3	14,3 ± 0,3	107,6 ± 18,8	9739,2 ± 106,6	175,0 ± 16,4	54,4 ± 5,4
	20	F3	1,6 ± 0,1	19,5 ± 2,6	4,5 ± 1,0	14,3 ± 0,8	84,3 ± 4,0	8160,2 ± 157,5	221,7 ± 2,0	53,7 ± 0,7
	21	F4	1,1 ± 0,1	17,3 ± 1,6	3,4 ± 0,2	12,3 ± 0,5	74,3 ± 3,3	10036,5 ± 31,2	214,5 ± 6,2	57,8 ± 7,8
	22	F5	1,9 ± 0	19,0 ± 1,8	4,3 ± 0,6	19,4 ± 0,7	107,0 ± 2,2	13234,6 ± 141,6	263,6 ± 15,2	69,5 ± 2,3
	23	F6	1,9 ± 0	25,2 ± 1,7	7,9 ± 0,9	17,1 ± 2,8	104,0 ± 6,2	10876,6 ± 312,8	245,6 ± 11,1	66,9 ± 4,6
Média		2	19	4,1	11,0	100,8	10138,8	140,6	44,0	
Desvio padrão		0,2	2,4	0,6	0,6	4,8	319,8	8,7	2,8	

Na análise de Componentes Principais (PCA), as duas primeiras PCs explicaram 66,48% da variância total nos dois primeiros componentes, evidenciando à tendência de formação de grupos que correspondem aos diferentes tipos de feijões, independentemente da marca ou do lote. As figuras 1^a mostra o gráfico de escores e a 1b, o gráfico de loadings.

Comparando-se estes dois gráficos nota-se que as concentrações dos metais Ca e Cu foram responsáveis por agrupar as amostras de feijão andu na parte superior do gráfico de escores. Os metais Zn, Fe e Mg promoveram o agrupamento das amostras de feijão branco e os metais Mn e Na, responsáveis pela separação das amostras do feijão fradinho (altas concentrações) e feijão mangalô (baixas concentrações). As amostras de feijão preto se agruparam no quadrante superior direito com concentrações baixas de K, Ca e Cu. As amostras de feijão carioca tenderam a se localizar no centro do gráfico e as amostras de feijão de corda estão dispersas sem tendência de formação de grupos apresentando concentrações medianas.

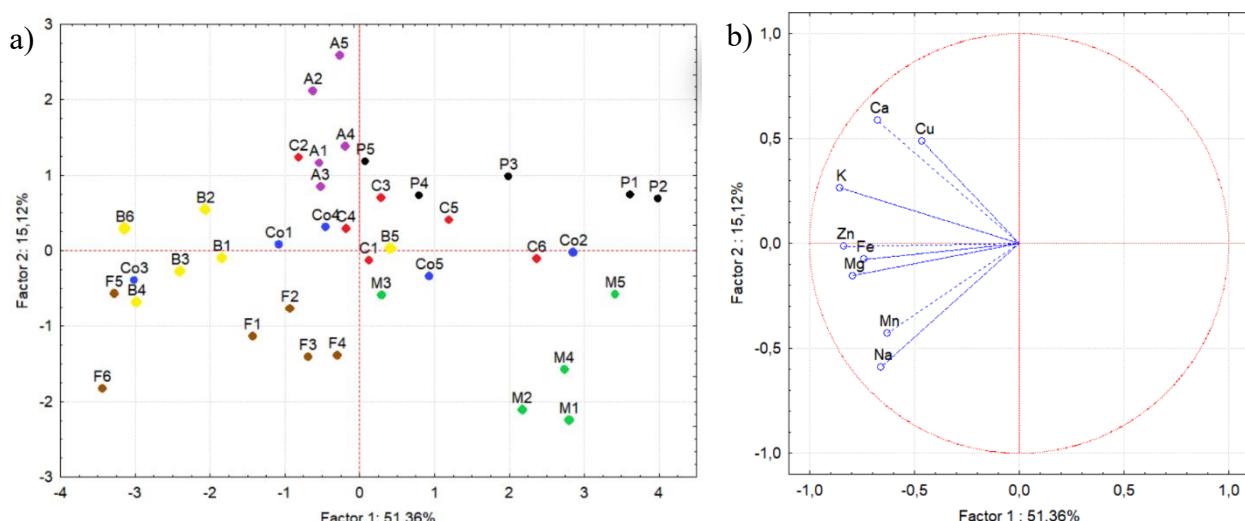


Figura 1. (a) gráfico de escores e (b) gráfico de cargas para PC1 e PC2 obtidos a partir do tratamento dos dados da determinação de metais em amostras de feijões comercializadas no sudoeste da Bahia.

Os Mapas Auto-organizáveis de Kohonen (SOM), apresentados na Figura 2, corroboraram os agrupamentos anteriores, demonstrando a capacidade dessa técnica em lidar com dados complexos e multidimensionais. A matriz de agrupamento (Figura 2a) indicou alta similaridade dentro dos grupos, mangalô e feijão-de-corda compartilham níveis semelhantes de grande parte dos minerais. Os feijões carioca e andu mostram alguma sobreposição de seus grupos, mas o andu se diferencia por estar mais afastado dos brancos e fradinhos, feijão preto está mais isolado dos outros apresentando um perfil mineral distinto, enquanto que fradinho e branco estão fortemente associados.

A matriz de distâncias (Figura 2b) indicou alta similaridade dentro dos grupos e boa separação entre eles, e os mapas de concentração (Figura 2c) evidenciaram quais elementos privilegiavam cada grupo, confirmando o papel discriminante de Fe no fradinho, branco e andu, Mn no mangalô e feijão-de-corda, Ca e K ligado ao preto, andu, fradinho e parte do carioca, Na está relacionado a andu e carioca. Mg associado a fradinho, branco e andu. Zn aparece em andu, carioca e fradinho, enquanto que o Cu com maior concentração em andu e alguns feijões cariocas.

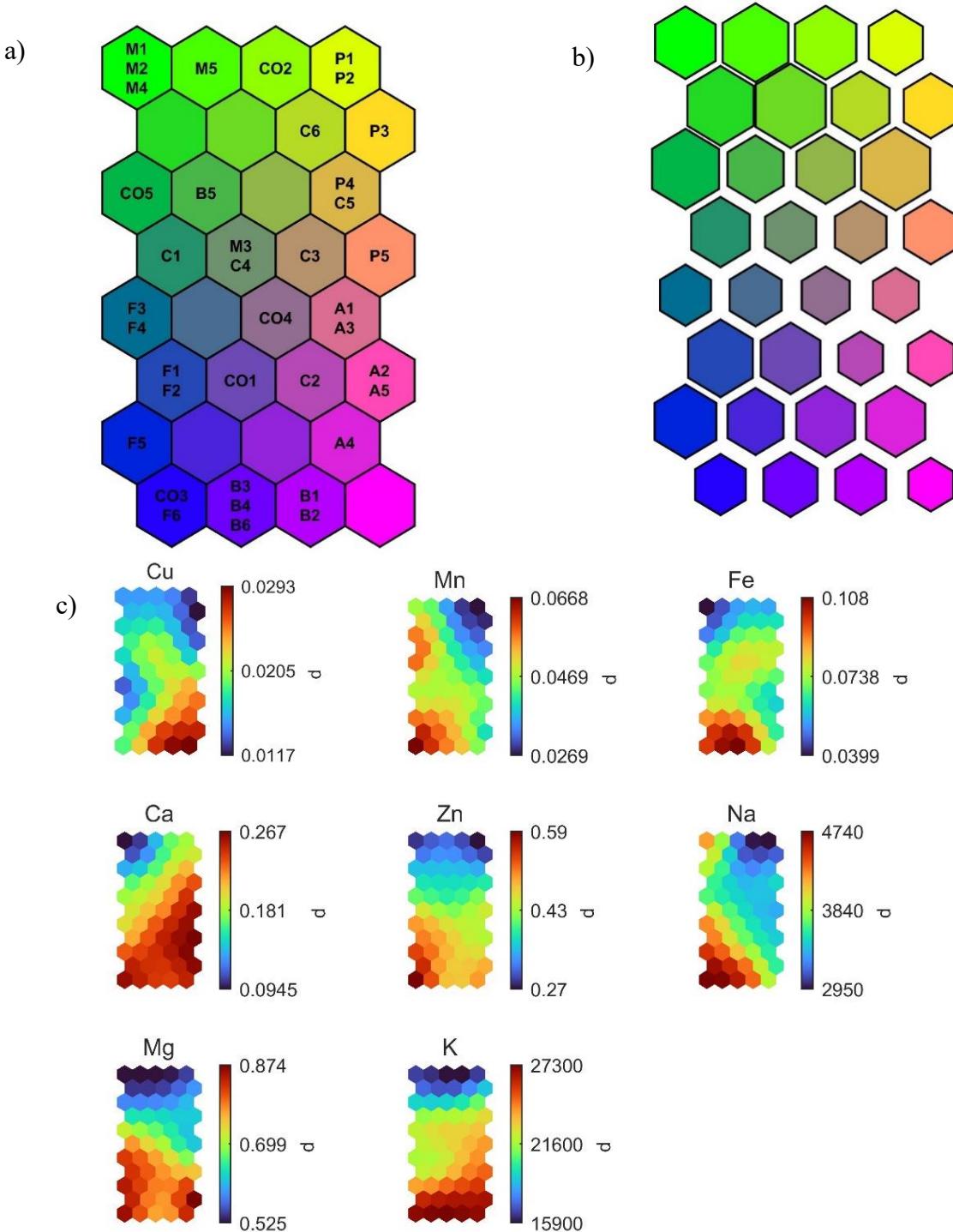


Figura 2. (a) Componentes do mapa neural mostrando a formação de grupos; (b) matriz de distâncias (U-matrix) e (c) Mapas de componentes para dados gerados a partir da análise elementar das amostras de feijão comercializadas no sudoeste da Bahia, cada mapa mostra as concentrações dos analitos em mg kg⁻¹.

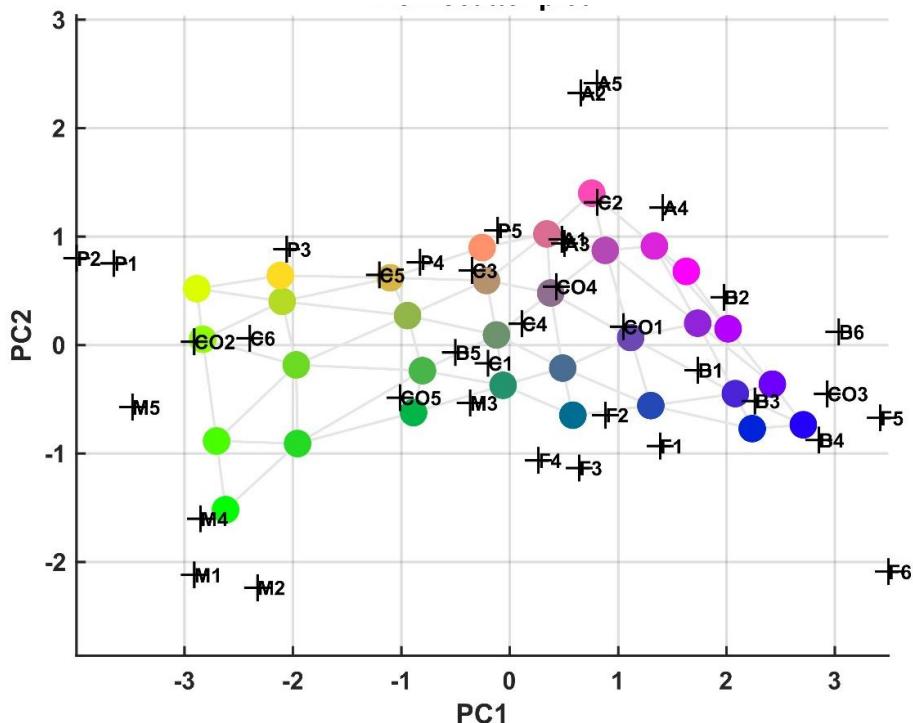


Figura 3. Mapa neural bidimensional das amostras de feijão

Além de validar a classificação e a influência dos minerais nos agrupamentos, a abordagem integrada reforça a importância da análise multivariada para compreender a variabilidade mineral e a origem dos feijões.

A elevada dispersão e variação nas concentrações, especialmente para elementos como Mg, Na e Cu, indicam que, apesar do controle industrial, fatores ambientais e agronômicos ainda contribuem significativamente para as diferenças observadas entre amostras semelhantes, aspecto que deve ser considerado em avaliações nutricionais. Por fim, o alinhamento dos dados com a literatura, aliado à aplicação das ferramentas multivariadas PCA e SOM, evidencia que o perfil mineral é fortemente associado ao tipo de feijão, e menos ao fabricante, reforçando a importância da matéria-prima na qualidade e composição nutricional dos produtos comercializados.

Conclusões

A análise de metais em amostras de feijões de diferentes tipos mostrou a variedade nas concentrações dos elementos. Os feijões verdes (andu, mangalô e feijão-de-corda) apresentaram maiores teores de Zn, Mg, Mn e Ca, sugerindo preservação mineral pela ausência de processamento térmico industrial. Já as variedades industrializadas (carioca, branco, preto e fradinho) mostraram variação relevante para Fe, Cu, Na e K, possivelmente associada a diferenças no beneficiamento e origem da matéria-prima.

A aplicação de técnicas multivariadas (PCA e Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen) permitiu identificar agrupamentos claros entre as amostras: (1) feijões verdes agrupados por elevadas concentrações de Zn, Mg, Ca e Mn; (2) grupo com predominância de feijões industrializados, associado a maiores teores de Fe e Cu; (3) subgrupos específicos com destaque

para K e Na; (4) padrões intermediários de composição mineral. As ferramentas multivariadas evidenciaram que o perfil mineral é mais característico do tipo de feijão do que da marca.

Adicionalmente, a integração das Redes Neurais Artificiais com os Mapas de Kohonen corroborou os resultados do PCA, oferecendo maior detalhamento das relações entre amostras e metais e confirmando que a composição mineral pode ser utilizada para diferenciar grupos de feijões. Este estudo reforça a aplicabilidade dessas técnicas na caracterização mineral e classificação, fornecendo subsídios para controle de qualidade, autenticação e avaliação de riscos nutricionais em produtos alimentares industrializados.

Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Química Analítica 2, Universidade Estadual da Bahia - UESB à CAPES, CNPq, FAPESB pelo suporte e contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

Referências

- [1] RONKO, Letícia Zander et al. Caracterização físico-química de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris L.*) e das propriedades tecnológicas de sua fração amido. Revista brasileira de tecnologia Agroindustrial, v. 15, n. 1, 2021.
- [2] REZENDE, Gerciana Aparecida; COELHO, Alexandre Bragança; TRAVASSOS, Guilherme Fonseca. Determinantes do consumo individual de arroz e feijão no Brasil em 2017/2018. Revista de Economia e Agronegócio, v. 19, n. 3, p. 1-22, 2021.
- [3] ARAÚJO, Danielle Silva et al. Efeitos hipoglicêmicos do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em roedores com diabetes mellitus. Arquivos de Ciências da Saúde, v. 30, 2023.
- [4] DA FONSECA, Alessandro Carvalho. BIOACUMULAÇÃO DE MACRO E MICROELEMENTOS EM PLANTAÇÃO DE FEIJÃO (*Vigna unguiculata L. WALP*) E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL RISCO AO CONSUMO HUMANO. 2022.
- [5] Hussain, S.A., Nadeem, M., Ayub, M.A. et al. Avaliação de risco à saúde associada à poluição por metais pesados em solos franco-argilosos arenosos e vegetais irrigados por águas residuais: um estudo de caso da cidade de Bahawalpur. *Solo da Eurásia Sc.* 58, 16 (2025).
- [6] Souza, A.S., Bezerra, M.A., Cerqueira, U.M.F.M. et al. An introductory review on the application of principal component analysis in the data exploration of the chemical analysis of food samples. *Food Sci Biotechnol* 33, 1323–1336 (2024).
- [7] VAN HULLE, Marc M. Self-organizing Maps. *Handbook of natural computing*, v. 1, p. 585-622, 2012.