



AGROTEC
Revista Agropecuária Técnica
Since 1981

ISSN impresso 0100-7467 - ISSN online 2525-8990

AGRARIAN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Composição bromatológica e mineral de partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga

Normando Ribeiro-Filho¹, José Pires Dantas¹

Resumo

O bioma Caatinga apresenta elevada diversidade de espécies forrageiras e não convencionais com potencial para a alimentação de ruminantes, especialmente em condições semiáridas. Este estudo teve como objetivo avaliar a composição bromatológica e mineral de diferentes partes vegetais de espécies da Caatinga. Amostras de caules, folhas, flores, raquetes, galhas e raízes foram coletadas, processadas e analisadas quanto aos teores de matéria seca, proteína bruta, gordura bruta, fibra bruta, cinzas, matéria orgânica e energia bruta, além da composição de macro e microminerais, utilizando metodologias analíticas padronizadas. Os resultados evidenciaram ampla variabilidade na composição química entre espécies e partes vegetais, refletindo suas funções estruturais e metabólicas. As folhas e flores apresentaram maiores teores de proteína e minerais, enquanto caules e raízes mostraram maior conteúdo fibroso. Os resultados demonstram o potencial nutricional dos recursos vegetais da Caatinga e reforçam sua importância como alternativas alimentares para sistemas pecuários sustentáveis em regiões semiáridas.

Palavras-chave: Caatinga, Espécies forrageiras, Composição bromatológica, Minerais, Alimentação animal

Abstract

The Caatinga biome hosts a wide diversity of forage and non-conventional plant species with potential application in ruminant feeding, especially under semi-arid conditions. This study aimed to evaluate the bromatological and mineral composition of different plant parts from forage and non-conventional Caatinga species. Samples of stems, leaves, flowers, cladodes, galls, and roots were collected, processed, and analyzed for dry matter, crude protein, ether extract, crude fiber, ash, organic matter, and gross energy, as well as macro- and micromineral contents, using standard analytical methods. The evaluated materials showed marked variability in chemical composition among species and plant fractions, reflecting differences in structural and metabolic functions. In general, leaves and flowers exhibited higher crude protein and mineral contents, whereas stems and roots showed higher fiber levels. These results highlight the nutritional potential of Caatinga plant resources and support their strategic use as alternative feed sources, contributing to sustainable livestock production in semi-arid environments.

Keywords: Caatinga, Forage species, Bromatological composition, Minerals, Animal feeding

Submetido em 22/06/2023;

¹Departamento de Solos e Engenharia Rural, DSER/CCA/UFPB – Bairro universitário, SN, CEP: 58.397-000, Areia-PB, Paraíba, Brasil

Email: normandofilho@cca.ufpb.br * (Autor correspondente)

Introdução

A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro e representa um dos ecossistemas mais singulares e estratégicos do Semiárido nordestino. Caracterizada por clima semiárido, altas temperaturas, chuvas irregulares e longos períodos de estiagem, a Caatinga abriga uma vegetação predominantemente xerófila, composta por espécies altamente adaptadas à escassez hídrica (Sampaio, 2002; Tabarelli, 2000). Apesar de historicamente associada à baixa produtividade, esse bioma apresenta elevada diversidade florística, com milhares de espécies vegetais, muitas delas endêmicas e com expressivo potencial forrageiro. Espécies como faveleira, jurema, mandacaru, xique-xique e juazeiro desempenham papel fundamental na manutenção da alimentação animal durante períodos críticos de seca, garantindo a sobrevivência dos rebanhos. No entanto, o uso intensivo e desordenado da vegetação nativa, aliado ao desmatamento e ao sobrepastoreio, tem acelerado processos de degradação e desertificação (Melo, 2000). Nesse contexto, a valorização das espécies forrageiras da Caatinga emerge como estratégia essencial para conciliar produção pecuária e conservação ambiental. Assim, compreender a diversidade, a adaptação ecológica e o potencial produtivo dessas espécies é fundamental para o desenvolvimento de sistemas agropecuários resilientes no Semiárido.

A composição bromatológica e mineral das plantas forrageiras constitui um dos principais indicadores de seu valor nutricional e de sua viabilidade na alimentação animal. No ambiente semiárido, as espécies da Caatinga desenvolveram mecanismos fisiológicos que permitem o acúmulo e a conservação de nutrientes mesmo sob condições edafoclimáticas adversas (Duque, 1980b; Luetzelburg, 1923). Muitas dessas plantas apresentam teores relevantes de proteína bruta, fibras estruturais, carboidratos solúveis e minerais essenciais, como cálcio, fósforo, magnésio e potássio, que são determinantes para o desempenho zootécnico dos animais. A faveleira (*Cnidocolus quercifolius*), por exemplo, destaca-se não apenas pela resistência à seca, mas também pela diversidade de compostos nutricionais distribuídos em suas diferentes partes vegetais, como folhas, ramos, sementes e raízes (Melo, 2000). Entretanto, a composição química dessas espécies pode variar significativamente conforme o órgão vegetal, estágio fenológico e condições ambientais. Dessa forma, a caracterização bromatológica e mineral detalhada torna-se indispensável para o uso racional dessas plantas. Em síntese, conhecer o perfil nutricional das espécies da Caatinga é um passo decisivo para maximizar seu aproveitamento forrageiro e reduzir deficiências nutricionais nos sistemas de produção animal do Semiárido.

A alimentação animal no Semiárido nordestino enfrenta desafios recorrentes, especialmente em função da irregularidade climática e da limitada disponibilidade de forragens convencionais. Durante os períodos de estiagem prolongada, a escassez de pastagens compromete a produtividade pecuária e acentua a vulnerabilidade socioeconômica das comunidades rurais (Moreira & Targino, 1997). Nesse cenário, o uso de espécies nativas da Caatinga assume importância estratégica, pois essas plantas apresentam maior resistência à seca e mantêm parte de seu valor nutritivo mesmo em condições extremas. O aproveitamento de forrageiras não convencionais, como a faveleira, permite reduzir a dependência de insumos externos e ampliar a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Araújo Filho & Carvalho, 1997). Além disso, a diversificação das fontes alimentares contribui para o equilíbrio nutricional dos rebanhos, melhorando a eficiência alimentar e a resiliência da produção animal. Entretanto, a adoção dessas espécies ainda é limitada pela falta de informações científicas sistematizadas sobre seu valor nutricional e mineral. Portanto, integrar o conhecimento tradicional com dados técnico-científicos é essencial para consolidar o uso das plantas da Caatinga na alimentação animal. Dessa maneira, a valorização dessas espécies fortalece a segurança alimentar, a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento regional.

Apesar do reconhecido potencial das espécies da Caatinga, ainda existem lacunas significativas quanto à caracterização nutricional detalhada de suas diferentes partes vegetais. Grande parte dos estudos concentra-se em poucas espécies ou avalia apenas frações específicas da planta, limitando a

compreensão de seu real potencial forrageiro (Melo, 2000). Nesse sentido, este trabalho se diferencia ao propor uma abordagem integrada, avaliando a composição bromatológica e mineral de diferentes órgãos vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga. Essa perspectiva inovadora permite identificar quais partes da planta apresentam maior valor nutricional, subsidiando estratégias mais eficientes de manejo e uso na alimentação animal. Além disso, a pesquisa contribui para a valorização de espécies nativas, fortalecendo práticas agroecológicas e promovendo a conservação do bioma. O objetivo deste estudo é avaliar a composição bromatológica e mineral de diferentes partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga, visando caracterizar seu potencial nutricional para uso na alimentação animal em regiões semiáridas. Como aplicações, os resultados podem orientar produtores, técnicos e formuladores de políticas públicas na adoção de sistemas produtivos mais resilientes, sustentáveis e compatíveis com as condições do Semiárido brasileiro.

Metodologia

As coletas das porções vegetais foram realizadas em municípios representativos do Semiárido nordestino, abrangendo áreas do Sertão, Cariri e Seridó, caracterizadas por clima semiárido quente, precipitação pluviométrica irregular e vegetação típica de Caatinga. Os municípios selecionados apresentam elevada ocorrência natural das espécies estudadas, como *Cereus jamacaru*, *Opuntia* spp., *Calotropis procera* e *Cnidoscolus quercifolius*, além de áreas de transição ecológica onde ocorre o feijão-bravo (Tabela 1). A escolha das áreas de coleta considerou a representatividade florística, a disponibilidade das diferentes porções vegetais e o uso tradicional dessas espécies na alimentação animal. As coletas foram realizadas em áreas não cultivadas, evitando-se indivíduos com sinais visíveis de estresse severo ou contaminação, garantindo a representatividade do material vegetal em condições naturais (Tabela 2). Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos identificados, transportadas ao laboratório e submetidas aos procedimentos de preparo e análises bromatológicas e minerais.

Tabela 1. Espécies, porções vegetais analisadas e principais municípios de ocorrência na Caatinga

Espécie popular	Nome científico	Porção vegetal analisada	Principais municípios/regiões de ocorrência
Mandacaru (cardeiro)	<i>Cereus jamacaru</i>	Galhas com espinhos	Petrolina (PE); Juazeiro (BA); Cabaceiras (PB); Monteiro (PB); Tauá (CE); Caicó (RN)
		Galhas sem espinhos	Cabaceiras (PB); Serra Branca (PB); Monteiro (PB); Caicó (RN); Currais Novos (RN)
Palmatória do Cariri	<i>Opuntia</i> spp.	Raquete com espinhos	Monteiro (PB); Sumé (PB); Cabaceiras (PB); Coxixola (PB); Cariri Ocidental (PB)
Flor-de-seda / flor-de-cera	<i>Calotropis procera</i>	Planta inteira	Campina Grande (PB); Soledade (PB); Patos (PB); Mossoró (RN); Quixadá (CE)
		Caule	Santa Luzia (PB); Patos (PB); Apodi (RN); Iguatu (CE)
		Folhas	Campina Grande (PB); Soledade (PB); Mossoró (RN); Quixeramobim (CE)
		Flores	Patos (PB); Santa Luzia (PB); Apodi (RN); Quixadá (CE)
Faveleira	<i>Cnidoscolus quercifolius</i>	Raízes finas (com espinhos)	Santa Luzia (PB); São Mamede (PB); Serra Branca (PB); Tauá (CE)
		Raízes finas (sem espinhos)	São João do Cariri (PB); Serra Branca (PB); Caicó (RN)

		Raízes grossas (com espinhos)	Santa Luzia (PB); São Mamede (PB); Currais Novos (RN); Crateús (CE)
		Raízes grossas (sem espinhos)	Serra Branca (PB); Caicó (RN); Tauá (CE)
		Caule fino (com espinhos)	São Mamede (PB); Santa Luzia (PB); Currais Novos (RN)
		Caule fino (sem espinhos)	Serra Branca (PB); São João do Cariri (PB); Caicó (RN)
		Caule grosso (com espinhos)	Santa Luzia (PB); São Mamede (PB); Tauá (CE)
		Caule grosso (sem espinhos)	Serra Branca (PB); Caicó (RN); Crateús (CE)
		Folhas verdes	São Mamede (PB); Santa Luzia (PB); Currais Novos (RN)
		Folhas secas (solo)	Serra Branca (PB); São João do Cariri (PB); Caicó (RN)
Feijão-bravo	<i>Canavalia</i> spp./ <i>ioclea</i> spp.	Folhas	Areia (PB); Bananeiras (PB); Solânea (PB); Brejo Paraibano

Tabela 2: Porções morfológicas do vegetal analisadas e seus respectivos códigos.

PORÇÃO DO VEGETAL ANALISADA	Code
Galhas do Cardeiro com espinhos (Mandacaru com espinhos)	GC-MCE
Galhas do Cardeiro sem espinhos (Mandacaru sem espinhos)	GC-MSE
Raquete da Palmatória do Cariri com espinhos	RP-CE
Planta inteira de flor-de-seda	PI-FDS
Caule de flor-de-seda	CL-FDS
Folhas de flor-de-seda	FL-FDS
Flores de flor-de-cera	FR-FDS
Raízes finas de faveleira com espinhos	RF-FCE
Raízes finas de faveleira sem espinhos	RF-FSE
Raízes grossas de faveleira com espinhos	RG-FCE
Raízes grossas de faveleira sem espinhos	RG-FSE
Caule fino de faveleira com espinhos	CF-FCE
Caule fino de faveleira sem espinhos	CF-FSE
Caule grosso de faveleira com espinhos	CG-FCE
Caule grosso de faveleira sem espinhos	CG-FSE
Folhas verdes de faveleira com espinhos	FV-FCE
Folhas verdes de faveleira sem espinhos	FV-FSE
Folhas secas da faveleira com espinhos coletadas no chão	FS-FCE
Folhas de feijão bravo	FR-FB

2.1. Composição bromatológica

2.1.1. Matéria seca (MS, %)

A matéria seca foi determinada pelo método gravimétrico, conforme a AOAC (2019). Aproximadamente 2 a 5 g de amostra previamente moída e homogeneizada foram pesadas em cápsulas de porcelana previamente secas e taradas. As amostras foram submetidas à secagem em estufa com circulação de ar forçado a 105 ± 2 °C até obtenção de massa constante (16 a 24 h). Após

a secagem, as cápsulas foram resfriadas em dessecador contendo sílica gel e novamente pesadas. A matéria seca foi calculada pela diferença entre a massa inicial e final da amostra e expressa em porcentagem (%).

2.1.2. Proteína bruta (PB, %)

A proteína bruta foi determinada pelo método de Kjeldahl, de acordo com a AOAC (2019). Amostras secas (0,2–0,5 g) foram submetidas à digestão com ácido sulfúrico concentrado na presença de catalisador. Após a digestão, procedeu-se à destilação do nitrogênio na forma de amônia, com posterior titulação. O teor de nitrogênio total foi convertido em proteína bruta utilizando o fator 6,25. Os resultados foram expressos em porcentagem (%).

2.1.3. Gordura bruta (GB, %)

A gordura bruta foi determinada por extração contínua em aparelho de Soxhlet, conforme metodologia da AOAC (2019). Aproximadamente 2 a 3 g de amostra seca foram submetidas à extração com éter de petróleo por 4 a 6 h. Após evaporação do solvente, o resíduo lipídico foi seco e pesado. Os resultados foram expressos em porcentagem (%).

2.1.4. Fibra bruta (FB, %)

A fibra bruta foi determinada pelo método de digestão ácido-alcálica, conforme AOAC (2019). Amostras secas e desengorduradas foram submetidas sucessivamente à digestão com ácido sulfúrico 1,25% e hidróxido de sódio 1,25%. O resíduo foi filtrado, lavado, seco a 105 °C e posteriormente incinerado em mufla a 550 °C. A fibra bruta foi calculada pela diferença entre o resíduo seco e o teor de cinzas, sendo expressa em porcentagem (%).

2.1.5. Energia bruta (EB)

A energia bruta foi determinada por combustão completa em bomba calorimétrica adiabática, conforme AOAC (2019). Amostras secas (0,5–1,0 g) foram combustas em atmosfera de oxigênio puro sob pressão. A energia liberada foi calculada a partir da variação de temperatura do sistema e expressa em kcal/kg de matéria seca.

2.1.7. Cinzas (CZ, %)

O teor de cinzas foi determinado por incineração em mufla, conforme AOAC (2019). Aproximadamente 2 g de amostra seca foram incineradas a 550 ± 25 °C por 4 a 6 h. Após resfriamento em dessecador, os cadinhos foram pesados e o teor de cinzas foi expresso em porcentagem (%).

2.1.8. Matéria orgânica (MO, %)

A matéria orgânica foi obtida por cálculo, utilizando a equação: $MO (\%) = 100 - CZ (\%)$.

2.2. Composição mineral

Para a determinação da composição mineral, as amostras foram submetidas à digestão ácido-nítrica, utilizando ácido nítrico concentrado (HNO_3), em sistema de aquecimento controlado, até obtenção de extrato claro. Os macrominerais fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica (AAS), sendo expressos em g/kg de matéria seca. Os microminerais cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) foram quantificados por AAS, sendo expressos em mg/kg de matéria seca.

2.3. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC). As médias obtidas foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, com o auxílio do software Statística® (versão 5.0). A Análise de Componentes Principais (ACP) foi realizada

utilizando o Statistica® (versão 5.0) para reduzir a dimensionalidade de conjuntos de dados multivariados complexos, melhorando a interpretabilidade e auxiliando na identificação de tendências e correlações entre tratamentos e amostras. O critério de Kaiser, baseado em autovalores maiores que 1 e variância cumulativa > 60%, foi utilizado para descrever e selecionar os dados para análise.

Resultados

Composição Bromatológica das partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga

A matéria seca (MS) é um parâmetro essencial para a caracterização físico-química de materiais vegetais, pois expressa a proporção de sólidos presentes e está diretamente associada ao teor de água e à estabilidade do material. Todas as amostras avaliadas apresentaram ampla variação nos teores de MS, oscilando de 7,61% (GC-MSE) a 87,51% (CF-FSE)(Figura 1). Entre os materiais analisados, as cactáceas, especialmente as galhas do cardeiro sem espinhos (GC-MSE) e com espinhos (GC-MCE), exibiram os menores valores de MS (7,61% e 18,77%, respectivamente)(Figura 1), evidenciando elevado conteúdo hídrico típico desses tecidos suculentos. Em contraste, as frações estruturais da faveleira, incluindo caules finos e grossos e raízes finas e grossas, com e sem espinhos, apresentaram consistentemente valores elevados de MS, superiores a 84%, destacando-se CF-FSE (87,51%), CG-FCE (87,20%) e CF-FCE (87,08%)(Figura 1). As folhas de feijão-bravo (FR-FB) apresentaram valor intermediário de MS (58,87%), enquanto folhas e flores de flor-de-seda exibiram MS inferior a 15%, indicando maior suculência (Figura 1). Essas diferenças refletem adaptações morfofisiológicas das espécies da Caatinga às condições semiáridas. Os resultados demonstram que frações lenhosas apresentam maior concentração de sólidos, enquanto tecidos suculentos apresentam menor teor de matéria seca.

A matéria orgânica (MO) corresponde à fração combustível do material vegetal e é inversamente relacionada ao teor de cinzas. Na Figura, os valores de MO variaram de 77,43% (GC-MCE) a 96,57% (CG-FCE)(Figura 1). As maiores concentrações de MO foram observadas nos caules grossos e raízes da faveleira, especialmente nas amostras com baixo teor de cinzas, como CG-FCE e RG-FSE (Figura 1). Em contraste, as galhas do cardeiro apresentaram os menores valores de MO, refletindo seu elevado conteúdo mineral (Figura 1). As folhas, flores e planta inteira de flor-de-seda exibiram valores intermediários de MO, > 85% (Figura 1). A elevada MO nas frações lenhosas indica maior proporção de compostos orgânicos estruturais, como celulose e lignina. Estes resultados demonstram que a matéria orgânica é maximizada em tecidos estruturais e reduzida em materiais ricos em minerais, evidenciando a complementaridade entre MO e CZ na caracterização bromatológica.

A fibra bruta (FB) é um parâmetro associado à fração estrutural dos materiais vegetais e exerce forte influência sobre a digestibilidade. Na Figura, os valores de FB variaram amplamente, de 3,74% (GC-MCE) a 57,62% (CG-FCE)(Figura 1). As maiores concentrações de fibra foram observadas nos caules grossos da faveleira, tanto com espinhos (57,62%) quanto sem espinhos (52,97%), seguidos pelas raízes grossas (RG-FCE e RG-FSE, acima de 45%)(Figura 1). Em contraste, as galhas do cardeiro e as folhas verdes de faveleira apresentaram baixos teores de FB, < 15% (Figura 1). A planta inteira e os caules de flor-de-seda exibiram valores intermediários de FB, refletindo a presença simultânea de tecidos estruturais e metabólicos. Esses resultados estão diretamente relacionados ao grau de lignificação e à função mecânica dos órgãos vegetais. Assim, observa-se que frações lenhosas apresentam maior caráter estrutural e menor digestibilidade potencial, enquanto folhas e tecidos suculentos tendem a apresentar menor teor de fibra. Em síntese, a FB destaca claramente a distinção funcional entre órgãos vegetais.

A gordura bruta (GB) representa a fração lipídica dos materiais vegetais e contribui diretamente para o valor energético e metabólico. Os valores de GB observados variaram de 0,70% (CL-FDS) a 13,20% (FR-FB)(Figura 1). Entre as amostras avaliadas, as folhas de feijão-bravo (FR-FB) apresentaram o maior teor de GB, seguidas pelas folhas secas da faveleira com espinhos (FS-FCE, 10,91%) e pelas flores e folhas de flor-de-seda (FR-FDS e FL-FDS, > 9%)(Figura 1). Em contraste, os caules de flor-de-seda e os caules grossos da faveleira exibiram baixos teores de GB, < 3%, indicando menor acúmulo de lipídios nesses tecidos estruturais (Figura 1). As galhas do cardeiro e a raquete da palmatória apresentaram valores intermediários de GB, refletindo composição química menos lipídica (Figura 1). A maior concentração de gordura em folhas e estruturas reprodutivas está associada à presença de membranas celulares e compostos bioativos. Dessa forma, os resultados evidenciam que frações foliares e reprodutivas contribuem de maneira mais significativa para o aporte lipídico, enquanto tecidos lenhosos apresentam menor relevância nesse aspecto.

A energia bruta (EB) expressa o conteúdo energético total dos materiais e está associada à composição química global, incluindo lipídios, carboidratos e proteínas. Os valores de EB variaram de 3.114 kcal kg⁻¹ (GC-MCE) a 5.622 kcal kg⁻¹ (FR-FB)(Figura 1). As folhas de feijão-bravo apresentaram o maior valor energético, seguidas pelas folhas verdes de faveleira e por várias frações lenhosas, que exibiram EB superior a 4.300 kcal kg⁻¹ (Figura 1). Em contraste, as galhas do cardeiro e a raquete da palmatória apresentaram os menores valores de EB, refletindo menor densidade energética (Figura 1). As flores e folhas de flor-de-seda também apresentaram EB relativamente elevada, associada ao maior teor de gordura e matéria orgânica. A variação observada indica que a EB resulta da interação entre diferentes constituintes químicos e não de um único componente isolado. Dessa forma, os materiais foliares e leguminosos apresentam maior potencial energético quando comparados às cactáceas suculentas.

A proteína bruta (PB) é um indicador fundamental do valor nutricional de materiais vegetais, especialmente no contexto da alimentação animal. Os teores de PB variaram significativamente entre as amostras, oscilando de 3,48% (CG-FCE) a 24,87% (FV-FSE)(Figura 1). Entre todas as frações avaliadas, as folhas verdes de faveleira sem espinhos (FV-FSE) apresentaram o maior teor proteico (24,87%), seguidas pelas folhas verdes com espinhos (FV-FCE, 15,10%) e pelas folhas e flores de flor-de-seda (FL-FDS e FR-FDS, com valores próximos a 14,5%)(Figura 1). Em contraste, os caules grossos da faveleira, tanto com quanto sem espinhos, exibiram os menores teores de PB, geralmente inferiores a 5%, refletindo seu caráter estrutural (Figura 1). As galhas do cardeiro sem espinhos (GC-MSE) apresentaram PB relativamente elevada (12,19%) quando comparadas às com espinhos (6,64%), indicando influência da morfologia na composição química (Figura 1). As raízes e caules finos apresentaram valores intermediários de PB, variando entre 4% e 8% (Figura 1). A maior concentração proteica em folhas está relacionada à intensa atividade metabólica e à assimilação de nitrogênio nesses tecidos. Assim, conclui-se que frações foliares e reprodutivas apresentam maior potencial nutricional proteico em comparação às frações lenhosas.

O teor de cinzas (CZ) representa a fração mineral dos materiais vegetais e fornece informações importantes sobre o acúmulo de elementos inorgânicos. Os valores de CZ variaram de 3,43% (CG-FCE) a 22,57% (GC-MCE)(Figura 1). As galhas do cardeiro, especialmente com espinhos, apresentaram os maiores teores de cinzas, indicando elevada concentração mineral (Figura 1). As raízes finas e grossas da faveleira exibiram valores intermediários de CZ, próximos a 19%, enquanto os caules grossos apresentaram os menores teores (Figura 1). As folhas e flores de flor-de-seda apresentaram valores moderados de cinzas, variando entre 10% e 17% (Figura 1). Essa distribuição reflete diferenças fisiológicas quanto à absorção, translocação e armazenamento de minerais nos tecidos vegetais. Portanto, os resultados indicam que cactáceas e raízes concentram maiores quantidades de minerais, enquanto tecidos lenhosos apresentam menor teor de cinzas. Em síntese, a CZ evidencia a heterogeneidade mineral entre as frações vegetais analisadas.

Code	MS	PB	GB	FB	EB	CZ	MO
GC-MCE	18,77	6,64	2,03	3,74	3.114	22,57	77,43
GC-MSE	7,61	12,19	1,04	14,85	3.404	18,69	81,31
RP-CE	28,14	4,46	1,85	18,2	3.398	18,4	81,6
PI-FDS	16,54	10,05	5,04	26,41	3.975	14,11	85,89
CL-FDS	30,49	4,28	0,7	49,86	4.096	7,04	92,96
FL-FDS	14,61	14,53	9,4	11,06	4.217	17,01	82,99
FR-FDS	14,6	14,32	9,72	19,34	4.493	10,95	89,05
RF-FCE	85,77	4,51	7,21	15,99	3.558	19,59	80,41
RF-FSE	86,13	8,81	7,64	15,66	4.295	19,46	80,54
RG-FCE	85,47	3,87	3,61	45,89	4.280	6,1	93,9
RG-FSE	84,6	5,15	2,91	47,34	4.533	4,96	95,04
CF-FCE	87,08	6,56	6,08	32,75	4.306	12,26	87,77
CF-FSE	87,51	7,52	5,51	33,74	4.384	13,21	86,79
CG-FCE	87,2	3,48	1,74	57,62	4.354	3,43	96,57
CG-FSE	86,34	4,68	2,77	52,97	4.493	5,63	94,37
FV-FCE	80,17	15,1	9,66	10,18	4.521	15,07	84,93
FV-FSE	84,08	24,87	8,4	12,31	4.482	11,65	83,35
FS-FCE	85,2	8,9	10,91	16,61	4.446	10,86	89,14
FR-FB	58,87	10,83	13,2	27,88	5.622	8,88	91,12

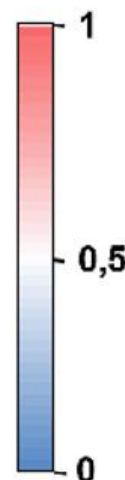


Figura 1: Mapa de calor da composição bromatológica das Partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga (Galhas do Cardeiro com espinhos (Mandacaru com espinhos) (GC-MCE), Galhas do Cardeiro sem espinhos (Mandacaru sem espinhos), (GC-MSE), Raquete da Palmatória do Cariri com espinhos (RP-CE), Planta inteira de flor-de-seda (PI-FDS), Caule de flor-de-seda (CL-FDS), Folhas de flor-de-seda (FL-FDS), Flores de flor-de-cera (FR-FDS), Raízes finas de faveleira com espinhos (RF-FCE), Raízes finas de faveleira sem espinhos (RF-FSE), Raízes grossas de faveleira com espinhos (RG-FCE), Raízes grossas de faveleira sem espinhos (RG-FSE), Caule fino de faveleira com espinhos (CF-FCE), Caule fino de faveleira sem espinhos (CF-FSE), Caule grosso de faveleira com espinhos (CG-FCE), Caule grosso de faveleira sem espinhos (CG-FSE), Folhas verdes de faveleira com espinhos (FV-FCE), Folhas verdes de faveleira sem espinhos (FV-FSE), Folhas secas da faveleira com espinhos coletadas no chão (FS-FCE), e Folhas de feijão bravo (FR-FB). A composição bromatológica inclui MS – Matéria Seca; PB - Proteína Bruta; GB – Gordura Bruta; FB - Fibra Bruta; EB – Energia Bruta; CZ – Cinzas; MO – Matéria Orgânica.

Composição macrominerais das Partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga

O fósforo, o potássio e o enxofre são macrominerais essenciais envolvidos no metabolismo energético, na regulação osmótica e na síntese de proteínas nos tecidos vegetais, influenciando diretamente seu valor nutricional e funcional. Nos materiais avaliados, os teores de fósforo (P) variaram amplamente, de 0,3 g kg⁻¹ de MS em GC-MCE e RP-CE a 5,1 g kg⁻¹ de MS em FR-FDS (Figura 2). Entre todas as amostras, FR-FDS e GC-MSE (4,1 g kg⁻¹ de MS) apresentaram os

maiores teores de P, enquanto os materiais cactáceos com espinhos exibiram, de modo geral, as menores concentrações (Figura 2). O potássio (K) apresentou a maior amplitude de variação entre os macrominerais, oscilando de 2,7 g kg⁻¹ de MS em CG-FCE a 46,4 g kg⁻¹ de MS em FL-FDS (Figura 2). Altas concentrações de K foram observadas em tecidos metabolicamente ativos, como FL-FDS (46,4 g kg⁻¹) e PI-FDS (36,5 g kg⁻¹), enquanto caules e raízes lenhosos da faveleira apresentaram valores significativamente menores (<10 g kg⁻¹)(Figura 2). Os teores de enxofre (S) variaram de 0,9 g kg⁻¹ de MS em CG-FCE e RG-FCE a 6,8 g kg⁻¹ de MS em FL-FDS, com níveis elevados também observados em FR-FB (5,3 g kg⁻¹)(Figura 2). Esses padrões refletem a alocação preferencial de P, K e S em folhas e estruturas reprodutivas, onde a atividade metabólica é mais intensa. Portanto, os resultados demonstram que as frações foliares e florais constituem fontes mais ricas desses macrominerais quando comparadas aos tecidos estruturais.

Code	g/kg da MS					mg/kg da MS			
	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
GC-MCE	0,3	27,5	50,8	10,3	1,4	7,5	165	700	12
GC-MSE	4,1	21	40,5	10	1,4	13,5	71	55	83
RP-CE	0,3	16,5	39,5	12,2	1,3	5	809	577	18
PI-FDS	2,8	36,5	11,4	10,2	5,9	5	156	143	26
CL-FDS	1,6	17,1	5	7	2,6	3,5	195	62	27
FL-FDS	2,9	46,4	17	11,2	6,8	3,5	194	336	20
FR-FDS	5,1	35,8	5,1	8	4,2	5	124	70,1	32
RF-FCE	1,5	14	10,8	4,5	1,6	7,5	1320	127	21
RF-FSE	3,4	24,5	20,1	4,6	1,4	12,5	1387	463	51
RG-FCE	0,9	7,9	3,6	2,5	0,9	4	402	44	8
RG-FSE	2,6	13	5,2	2	1	5	463	39	13
CF-FCE	1,2	5,1	27	5	1,4	7	367	204	22
CF-FSE	1,8	11,3	33,8	2,8	1,6	8,5	634	230	30
CG-FCE	0,6	2,7	6,6	2,5	0,9	5	108	47	12
CG-FSE	1,3	7,5	11,8	1,6	1,2	6	188	88	11
FV-FCE	1,8	9,3	27	10,1	2,4	5,1	770	138	18
FV-FSE	3,7	16	19,8	10	4,4	8,5	530	116	24
FS-FCE	0,5	6,1	17	8,1	1,2	7	396	64	14
FR-FB	0,8	10,9	17,8	3,1	5,3	4	47	392	24

Figura 2: Mapa de calor da composição mineral das Partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga (Galhas do Cardeiro com espinhos (Mandacaru com espinhos) (GC-MCE), Galhas do Cardeiro sem espinhos (Mandacaru sem espinhos), (GC-MSE), Raquete da Palmatória do Cariri com espinhos (RP-CE), Planta inteira de flor-de-seda (PI-FDS), Caule de flor-de-seda (CL-FDS), Folhas de flor-de-seda (FL-FDS), Flores de flor-de-cera (FR-FDS), Raízes finas de faveleira com espinhos RF-FCE), Raízes finas de faveleira sem espinhos (RF-FSE), Raízes grossas de faveleira com espinhos (RG-FCE), Raízes grossas de faveleira sem espinhos (RG-FSE), Caule fino de faveleira com espinhos (CF-FCE), Caule fino de faveleira sem espinhos (CF-FSE), Caule grosso de faveleira com espinhos (CG-FCE), Caule grosso de faveleira sem espinhos (CG-FSE), Folhas verdes de faveleira com espinhos (FV-FCE), Folhas verdes de faveleira sem espinhos (FV-FSE), Folhas secas da faveleira com espinhos coletadas no chão (FS-FCE), e Folhas de feijão bravo (FR-FB). A composição mineral inclui P – Fósforo; K – Potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; S – Enxofre; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – Zinco.

O cálcio e o magnésio desempenham papéis fundamentais na estabilização da parede celular, na integridade das membranas e nos processos fotossintéticos, tornando sua distribuição entre os órgãos vegetais altamente relevante. Os teores de cálcio (Ca) variaram amplamente entre as amostras, de 3,6 g kg⁻¹ de MS em RG-FCE a 50,8 g kg⁻¹ de MS em GC-MCE (Figura 2). As maiores concentrações de Ca foram registradas nos materiais cactáceos, especialmente em GC-MCE (50,8 g kg⁻¹) e GC-MSE (40,5 g kg⁻¹), evidenciando o forte acúmulo desse elemento em tecidos suculentos (Figura 2). Em contraste, frações lenhosas, como caules grossos e raízes da faveleira, apresentaram, de modo geral, menores teores de Ca, frequentemente abaixo de 12 g kg⁻¹ de MS (Figura 2). Os teores de magnésio (Mg) variaram de 1,6 g kg⁻¹ de MS em CG-FSE a 12,2 g kg⁻¹ de MS em RP-CE, com maiores valores observados em folhas e tecidos fotossinteticamente ativos, como FL-FDS (11,2 g kg⁻¹) e FV-FCE (10,1 g kg⁻¹) (Figura 2). Esses resultados indicam que a distribuição de Mg está fortemente associada a tecidos ricos em clorofila, enquanto o Ca se acumula preferencialmente em estruturas cactáceas. Os padrões contrastantes de Ca e Mg destacam a influência da função do órgão e das características anatômicas na partição mineral, evidenciando que materiais cactáceos são importantes reservatórios de Ca, enquanto as folhas são particularmente enriquecidas em Mg.

Composição microminerais das Partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga

O cobre e o ferro são micronutrientes essenciais que atuam como cofatores em reações de oxirredução e em sistemas enzimáticos, e seus padrões de acúmulo fornecem informações importantes sobre a adaptação vegetal e o potencial nutricional. As concentrações de cobre (Cu) variaram de 3,5 mg kg⁻¹ de MS em CL-FDS e FL-FDS a 13,5 mg kg⁻¹ de MS em GC-MSE (Figura 2). Teores elevados de Cu também foram observados em RF-FSE (12,5 mg kg⁻¹) e CF-FSE (8,5 mg kg⁻¹), enquanto a maioria dos tecidos aéreos apresentou valores intermediários, entre 4 e 7 mg kg⁻¹ (Figura 2). O ferro (Fe) apresentou a maior variabilidade entre todos os micronutrientes, com valores entre 47 mg kg⁻¹ de MS em FR-FB e 1.387 mg kg⁻¹ de MS em RF-FSE (Figura 2). As raízes da faveleira, com e sem espinhos, apresentaram concentrações extremamente elevadas de Fe (1.320–1.387 mg kg⁻¹), indicando elevada capacidade de acúmulo desse elemento em tecidos subterrâneos (Figura 2). Em contraste, materiais cactáceos e folhas exibiram, em geral, teores intermediários de Fe, tipicamente entre 150 e 800 mg kg⁻¹ (Figura 2). Essas diferenças refletem as interações solo-planta e o papel fisiológico das raízes como principais sítios de absorção de micronutrientes (Figura 2). Estes resultados evidenciam que as raízes atuam como importantes reservatórios de Fe, enquanto o Cu apresenta distribuição mais equilibrada entre os diferentes órgãos vegetais.

O manganês e o zinco estão envolvidos em processos como fotossíntese, ativação enzimática e regulação hormonal, e sua distribuição varia substancialmente entre os tecidos vegetais. As concentrações de manganês (Mn) variaram de 39 mg kg⁻¹ de MS em RG-FSE a 700 mg kg⁻¹ de MS em GC-MCE (Figura 2). Teores elevados de Mn foram observados em materiais cactáceos, especialmente em GC-MCE (700 mg kg⁻¹) e RP-CE (577 mg kg⁻¹), enquanto raízes e caules lenhosos apresentaram valores comparativamente menores (<100 mg kg⁻¹) (Figura 2). As folhas da faveleira e da flor-de-seda exibiram teores intermediários de Mn, refletindo sua intensa atividade fotossintética (Figura 2). Os teores de zinco (Zn) variaram de 8 mg kg⁻¹ de MS em RG-FCE a 83 mg kg⁻¹ de MS em GC-MSE (Figura 2). A maior concentração de Zn foi registrada em GC-MSE, enquanto folhas e flores de flor-de-seda apresentaram valores moderados, variando de 20 a 32 mg kg⁻¹ (Figura 2). Esses padrões indicam acúmulo preferencial de Mn e Zn em órgãos específicos, influenciado pela demanda fisiológica e pelas características estruturais dos tecidos (Figura 2). De modo geral, os resultados demonstram que tecidos cactáceos são particularmente enriquecidos em Mn e Zn, enquanto as demais frações apresentam níveis mais moderados e equilibrados, ressaltando

a heterogeneidade mineral dos materiais vegetais da Caatinga e seu potencial para usos direcionados com base na composição mineral.

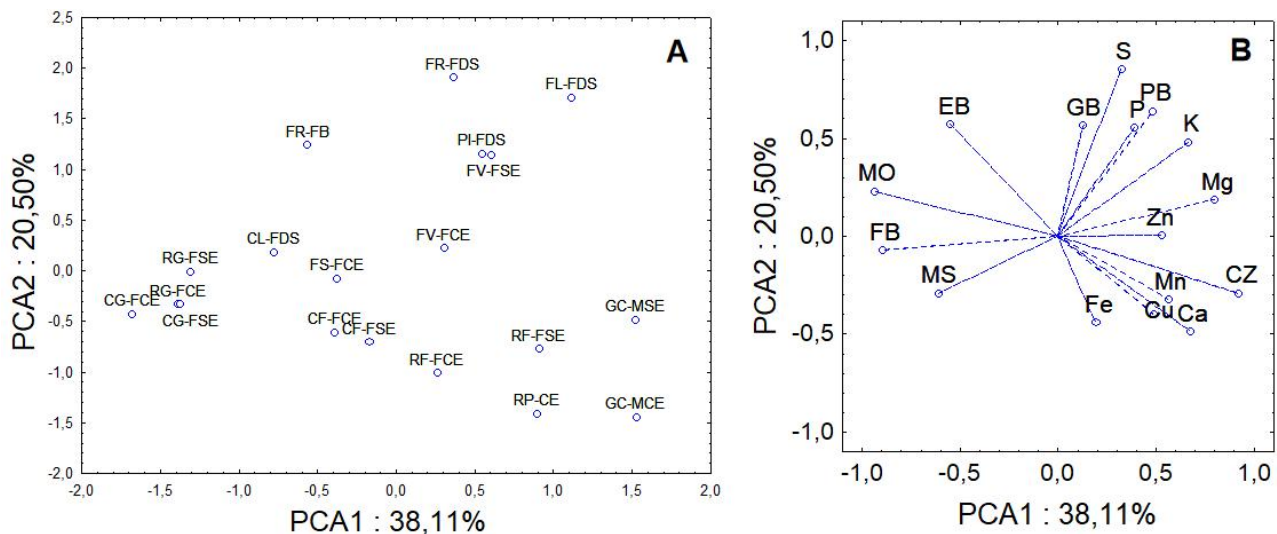


Figura 3: (a) PCA score plot demonstrando variação do composição bromatológica e composição mineral das Partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga; e (b) PCA loading plot demonstrando variação do composição bromatológica e composição mineral das Partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga. As partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga avaliadas foram Galhas do Cardeiro com espinhos (Mandacaru com espinhos) (GC-MCE), Galhas do Cardeiro sem espinhos (Mandacaru sem espinhos), (GC-MSE), Raquete da Palmatória do Cariri com espinhos (RP-CE), Planta inteira de flor-de-seda (PI-FDS), Caule de flor-de-seda (CL-FDS), Folhas de flor-de-seda (FL-FDS), Flores de flor-de-cera (FR-FDS), Raízes finas de faveleira com espinhos RF-FCE), Raízes finas de faveleira sem espinhos (RF-FSE), Raízes grossas de faveleira com espinhos (RG-FCE), Raízes grossas de faveleira sem espinhos (RG-FSE), Caule fino de faveleira com espinhos (CF-FCE), Caule fino de faveleira sem espinhos (CF-FSE), Caule grosso de faveleira com espinhos (CG-FCE), Caule grosso de faveleira sem espinhos (CG-FSE), Folhas verdes de faveleira com espinhos (FV-FCE), Folhas verdes de faveleira sem espinhos (FV-FSE), Folhas secas da faveleira com espinhos coletadas no chão (FS-FCE), e Folhas de feijão bravo (FR-FB). Os parametros avaliados da composição bromatológica (incluindo MS – Matéria Seca; PB - Proteína Bruta; GB – Gordura Bruta; FB - Fibra Bruta; EB – Energia Bruta; CZ – Cinzas; MO – Matéria Orgânica); e composição mineral (incluindo P – Fósforo; K – Potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; S – Enxofre; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – Zinco).

Para a compreensão integrada das relações entre a composição bromatológica e mineral das diferentes frações vegetais avaliadas, os dados foram resumidos por meio de uma Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 3). Os dois primeiros componentes explicaram conjuntamente 58,6% da variância total, sendo PC1 responsável por 38,1% e PC2 por 20,5%, valores considerados adequados para interpretação segundo o critério de Kaiser (autovalores > 1)(Figura 3). No biplot de scores (Figura 3A), PC1 separou claramente as cactáceas e galhas do cardeiro (GC-MCE e GC-MSE), associadas a maiores teores de cinzas (CZ), cálcio (Ca), cobre (Cu), manganês (Mn) e ferro (Fe), das frações lenhosas da faveleira (caules e raízes), associadas a maiores teores de matéria seca (MS), fibra bruta (FB) e matéria orgânica (MO)(Figura 3A). Por outro lado, a PC2 discriminou principalmente as frações foliares e reprodutivas, como folhas verdes de faveleira (FV-FSE e FV-FCE), folhas e flores de flor-de-seda (FL-FDS e FR-FDS) e folhas de feijão-bravo (FR-FB), que se associaram positivamente à proteína bruta (PB), gordura bruta (GB), energia bruta (EB) e aos macrominerais potássio (K), magnésio (Mg) e enxofre (S) (Figura 3A).

Essas associações indicam que tecidos metabolicamente ativos concentram compostos energéticos e nitrogenados, enquanto tecidos estruturais concentram fibra e matéria orgânica. A PCA evidenciou padrões consistentes de agrupamento e correlação, reforçando a influência do tipo de órgão vegetal sobre a composição química e mineral das espécies estudadas.

Tabela 3: Tabela de person (n) para composição bromatológica e composição mineral das partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga.

	MS	PB	GB	FB	EB	CZ	MO	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
MS	1,00															
PB	-0,17	1,00														
GB	0,18	0,56	1,00													
FB	0,37	-0,58	-0,46	1,00												
EB	0,44	0,24	0,62	0,33	1,00											
CZ	-0,41	0,21	0,09	-0,86	-0,63	1,00										
MO	0,37	-0,35	-0,12	0,89	0,60	-0,98	1,00									
P	-0,32	0,62	0,18	-0,27	0,05	0,14	-0,20	1,00								
K	-0,77	0,37	0,12	-0,49	-0,28	0,49	-0,48	0,58	1,00							
Ca	-0,28	0,12	-0,15	-0,59	-0,51	0,71	-0,71	-0,17	0,07	1,00						
Mg	-0,69	0,52	0,07	-0,74	-0,49	0,62	-0,66	0,23	0,58	0,49	1,00					
S	-0,48	0,61	0,53	-0,32	0,32	0,09	-0,14	0,41	0,68	-0,18	0,41	1,00				
Cu	0,08	0,19	-0,10	-0,38	-0,34	0,51	-0,54	0,37	-0,01	0,49	0,06	-0,34	1,00			
Fe	0,46	-0,07	0,15	-0,30	-0,18	0,43	-0,44	0,00	-0,13	0,07	-0,07	-0,32	0,37	1,00		
Mn	-0,30	-0,06	0,03	-0,50	-0,30	0,64	-0,62	-0,29	0,31	0,67	0,34	0,08	0,11	0,20	1,00	
Zn	-0,37	0,28	-0,08	-0,31	-0,22	0,41	-0,40	0,62	0,28	0,31	0,22	0,04	0,76	0,06	-0,04	1,00

Os parâmetros avaliados da composição bromatológica (incluindo MS – Matéria Seca; PB - Proteína Bruta; GB – Gordura Bruta; FB - Fibra Bruta; EB – Energia Bruta; CZ – Cinzas; MO – Matéria Orgânica); e composição mineral (incluindo P – Fósforo; K – Potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; S – Enxofre; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Zn – Zinco).

Para compreender as inter-relações entre os parâmetros bromatológicos e minerais avaliados, os dados foram resumidos por meio de uma matriz de correlação de Pearson, destacando associações positivas e negativas relevantes ($|r| \geq 0,60$) (Tabela 3/Figura 3B). Observou-se forte correlação positiva entre matéria orgânica (MO) e fibra bruta (FB) ($r = 0,89$), indicando que frações mais fibrosas contribuem diretamente para o aumento do conteúdo orgânico total (Tabela 3/Figura 3B). A energia bruta (EB) apresentou correlação positiva moderada a forte com gordura bruta (GB) ($r = 0,62$) e MO ($r = 0,60$), sugerindo que lipídios e compostos orgânicos são determinantes para o potencial energético dos materiais (Tabela 3/Figura 3B). Em contraste, as cinzas (CZ) mostraram correlação negativa muito forte com MO ($r = -0,98$) e FB ($r = -0,86$), evidenciando que o aumento da fração mineral ocorre à custa da fração orgânica estrutural (Tabela 3/Figura 3B). Entre os minerais, destacam-se correlações positivas entre fósforo (P) e proteína bruta (PB) ($r = 0,62$), potássio (K) e enxofre (S) ($r = 0,68$), bem como cálcio (Ca) com cinzas ($r = 0,71$) e manganês (Mn) ($r = 0,67$), indicando coacumulação mineral (Tabela 3/Figura 3B). O magnésio (Mg) correlacionou-se negativamente com FB ($r = -0,74$) e MO ($r = -0,66$), enquanto o zinco (Zn) apresentou forte correlação positiva com cobre (Cu) ($r = 0,76$) (Tabela 3/Figura 3B). A matriz de correlação revela interações complexas e coerentes entre frações orgânicas, energéticas e minerais, reforçando que a composição química depende do balanço entre estrutura vegetal e acúmulo mineral.

Discussão

Variação da composição bromatológica e estratégias adaptativas das espécies da Caatinga. A ampla variação observada na composição bromatológica das diferentes partes vegetais avaliadas reflete diretamente as estratégias adaptativas das espécies da Caatinga frente às condições ambientais extremas do semiárido. A matéria seca (MS) apresentou diferenças marcantes entre tecidos suculentos e frações estruturais, com valores extremamente baixos nas galhas do cardeiro (GC-MSE e GC-MCE) e elevados nas frações lenhosas da faveleira, como caules e raízes. Esse

padrão é consistente com o papel fisiológico da água nos tecidos vegetais, uma vez que plantas suculentas acumulam grandes volumes de água como mecanismo de sobrevivência, enquanto tecidos estruturais priorizam a deposição de compostos sólidos, como celulose e lignina. De forma análoga ao observado em culturas como o arroz, em que a relação entre conteúdo hídrico e acúmulo de carboidratos é intrinsecamente ligada à função metabólica do tecido, nas espécies da Caatinga a água atua como regulador da composição química e da estabilidade estrutural (Wang et al., 2018).

A matéria orgânica (MO), por sua vez, apresentou comportamento inversamente proporcional ao teor de cinzas, reforçando que tecidos com maior acúmulo mineral, como as galhas do cardeiro, apresentam menor fração orgânica combustível. Essa relação negativa entre MO e CZ ($r = -0,98$) confirma que a composição do material vegetal é determinada por um balanço entre frações orgânicas e inorgânicas, fenômeno amplamente descrito em estudos de ecofisiologia vegetal. Além disso, os elevados teores de fibra bruta (FB) em caules e raízes da faveleira indicam alto grau de lignificação, o que reduz a digestibilidade, mas aumenta a resistência estrutural e a persistência da planta no ambiente. Crude fiber (CF) contains cellulose, lignin, pentosans, non-water soluble hemicellulose and other components, which are carbohydrates (mainly lignocellulose) and compose the largest part of agricultural waste materials (Jacob et al. 2019; Ravindran et al. 2018). Assim, os resultados demonstram que a heterogeneidade bromatológica observada não é aleatória, mas reflete a especialização funcional de cada órgão vegetal, evidenciando que a Caatinga abriga espécies altamente eficientes na alocação de recursos, com implicações diretas para o uso direcionado dessas frações na alimentação animal.

Proteína, lipídios e energia: implicações nutricionais para alimentação animal. Os teores de proteína bruta (PB), gordura bruta (GB) e energia bruta (EB) observados evidenciam que determinadas frações vegetais da Caatinga possuem elevado potencial nutricional, especialmente quando comparadas a forragens convencionais utilizadas em regiões semiáridas. As folhas verdes de faveleira, particularmente a fração sem espinhos (FV-FSE), apresentaram teores proteicos superiores a 24%, valor comparável ou até superior ao de muitas leguminosas forrageiras tradicionais. Esse padrão está diretamente relacionado à intensa atividade metabólica desses tecidos, nos quais ocorre maior assimilação de nitrogênio e síntese proteica, processo semelhante ao descrito para culturas como o arroz, em que proteínas são acumuladas a partir da absorção de nitrato e amônio do solo e sua conversão em aminoácidos (Wang et al., 2018; Ribeiro-Filho et al., 2021).

Os elevados teores de GB observados em folhas de feijão-bravo, folhas secas da faveleira e estruturas reprodutivas indicam maior acúmulo de lipídios, compostos fundamentais para o valor energético e para a integridade das membranas celulares. A correlação positiva entre GB e EB ($r = 0,62$) reforça que a fração lipídica exerce papel central na densidade energética dos materiais, assim como observado em grãos de arroz com maior teor de lipídios (Samyot et al., 2017). A energia bruta mais elevada nas frações foliares e leguminosas, em contraste com as cactáceas, demonstra que o potencial energético não depende exclusivamente da matéria seca, mas da interação entre lipídios, proteínas e compostos orgânicos totais. Esses achados têm implicações diretas para a formulação de dietas, pois indicam que a inclusão estratégica de folhas e flores pode melhorar significativamente o aporte proteico e energético, reduzindo a necessidade de suplementos concentrados. Portanto, os resultados reforçam que as espécies da Caatinga não apenas sobrevivem em ambientes adversos, mas produzem tecidos com elevado valor nutricional, desde que suas frações sejam corretamente selecionadas.

Distribuição de macrominerais e sua relevância fisiológica e zootécnica. A distribuição dos macrominerais fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) entre as diferentes partes vegetais evidencia padrões fisiológicos consistentes e altamente relevantes para a nutrição animal. Os maiores teores de P, K e S foram observados em folhas e estruturas reprodutivas, como folhas e flores de flor-de-seda, refletindo a intensa atividade metabólica desses tecidos. O potássio, elemento essencial na regulação osmótica e no transporte de solutos, apresentou

valores excepcionalmente elevados em tecidos foliares, corroborando sua função central na fotossíntese e no controle estomático, conforme amplamente descrito na literatura (Wang et al., 2018). Em contraste, os tecidos estruturais da faveleira apresentaram baixos teores desses minerais, indicando menor demanda metabólica.

O cálcio apresentou comportamento oposto, com acúmulo expressivo nas galhas do cardeiro, especialmente na presença de espinhos. Esse padrão sugere forte deposição de Ca em tecidos suculentos, possivelmente associado à estabilização da parede celular e à tolerância ao estresse hídrico, fenômeno semelhante ao acúmulo de minerais em camadas externas de grãos descrito para arroz pigmentado (Samyot et al., 2017). O magnésio, por sua vez, concentrou-se preferencialmente em folhas, refletindo sua função estrutural na molécula de clorofila e sua participação direta na fotossíntese. A PCA reforçou essas tendências ao agrupar folhas e flores com K, Mg e S, enquanto cactáceas se associaram fortemente a Ca e cinzas totais. Do ponto de vista zootécnico, esses resultados indicam que a combinação de diferentes frações vegetais pode contribuir para dietas mais equilibradas em minerais, reduzindo deficiências comuns em sistemas extensivos do semiárido. Assim, a heterogeneidade mineral observada amplia o potencial de uso estratégico dessas espécies como fontes naturais de macrominerais.

Microminerais, interações solo-planta e implicações nutricionais. Os padrões de distribuição dos microminerais cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) revelam a complexa interação entre solo, planta e função do órgão vegetal, com implicações diretas para a nutrição animal. As cinzas contêm Si, Na, Ca, K, Mg, P, Al, Fe, Mn e metais pesados (Shojaiearani *et al.* 2019, Magdziarz *et al.* 2016). As raízes da faveleira apresentaram concentrações extremamente elevadas de ferro, ultrapassando 1.300 mg kg⁻¹ de MS, evidenciando seu papel como principal sítio de absorção e acúmulo desse micronutriente. Esse comportamento é consistente com o fato de o Fe possuir baixa mobilidade no floema, resultando em sua retenção em tecidos subterrâneos, conforme descrito em estudos de fisiologia vegetal (Wang et al., 2018). Em contraste, o cobre apresentou distribuição mais homogênea entre os tecidos, com valores moderados na maioria das frações, sugerindo maior mobilidade interna e participação equilibrada em sistemas enzimáticos.

O manganês destacou-se pelo elevado acúmulo em materiais cactáceos, especialmente GC-MCE, indicando que esses tecidos atuam como reservatórios desse elemento, fundamental para a fotossíntese e ativação enzimática. O zinco, por sua vez, apresentou associação positiva com o cobre ($r = 0,76$), sugerindo mecanismos de coacumulação, possivelmente relacionados a vias metabólicas compartilhadas ou características estruturais dos tecidos. Esses padrões são análogos ao observado em grãos de arroz, nos quais a concentração mineral depende tanto de fatores genéticos quanto das condições edafoclimáticas (Ratsewo et al., 2019). Do ponto de vista da alimentação animal, a presença de elevadas concentrações de Fe, Mn e Zn em determinadas frações pode ser vantajosa para suprir micronutrientes essenciais, mas também requer cautela quanto a possíveis excessos e interações antagonicas. Portanto, os resultados evidenciam que as espécies da Caatinga possuem elevado potencial como fontes naturais de microminerais, desde que seu uso seja tecnicamente orientado e baseado na composição específica de cada órgão vegetal.

Integração multivariada e implicações práticas para uso forrageiro. A análise integrada por PCA e correlação de Pearson forneceu uma visão sistêmica das inter-relações entre os parâmetros bromatológicos e minerais, reforçando que a composição química das espécies da Caatinga é fortemente determinada pelo tipo de órgão vegetal. A separação clara observada na PC1 entre cactáceas ricas em cinzas e minerais e frações lenhosas ricas em MS, FB e MO evidencia dois eixos funcionais distintos: armazenamento mineral versus suporte estrutural. De forma complementar, a PC2 destacou as frações foliares e reprodutivas como centros de acúmulo de proteína, lipídios, energia e macrominerais metabólicos, padrão semelhante ao observado em tecidos metabolicamente ativos de culturas agrícolas (Wang et al., 2018). As correlações reforçam essas interpretações, com associações positivas entre PB e P, GB e EB, e negativas entre CZ e MO, evidenciando que o

aumento da fração mineral ocorre à custa da fração orgânica. Esse comportamento é análogo ao descrito para alimentos vegetais submetidos a diferentes processos metabólicos e estruturais, como observado em estudos com arroz e resíduos agroindustriais (Samyot et al., 2017; Ribeiro-Filho et al., 2021). Do ponto de vista aplicado, esses resultados indicam que não existe uma “melhor” planta ou fração isolada, mas sim combinações estratégicas que podem maximizar o valor nutricional das dietas animais. A utilização integrada de folhas ricas em proteína e energia, associadas a frações minerais como cactáceas, pode reduzir custos com suplementação e aumentar a sustentabilidade dos sistemas produtivos. A abordagem multivariada confirma que a diversidade funcional das espécies da Caatinga é um ativo nutricional valioso, cuja exploração racional pode transformar limitações ambientais em oportunidades para a alimentação animal no semiárido.

Os resultados deste estudo evidenciam, de maneira inédita e sistemática, a elevada heterogeneidade bromatológica e mineral entre diferentes partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga, demonstrando que o valor nutricional desses materiais é fortemente dependente do tipo de órgão vegetal. As principais descobertas indicam que tecidos foliares e reprodutivos concentram maiores teores de proteína bruta, gordura bruta, energia bruta e macrominerais metabólicos (K, Mg e S), enquanto frações lenhosas e raízes se destacam pelo elevado teor de matéria seca, fibra bruta e matéria orgânica, e as cactáceas pelo expressivo acúmulo de cinzas, cálcio e micronutrientes como Mn e Fe. A aplicação de ferramentas multivariadas (PCA e correlação de Pearson) representa uma novidade relevante ao evidenciar padrões claros de agrupamento e coacumulação de nutrientes, permitindo identificar frações vegetais com potencial direcionado para uso forrageiro, suplementação mineral ou aproveitamento energético. Do ponto de vista científico, o estudo amplia o conhecimento sobre a ecofisiologia nutricional de espécies da Caatinga, ainda pouco exploradas. Industrialmente, os resultados abrem perspectivas para o uso estratégico dessas biomassas na alimentação animal, formulação de dietas regionais e aproveitamento de recursos locais em sistemas semiáridos. Como limitações, destaca-se a ausência de ensaios de digestibilidade e biodisponibilidade mineral. Estudos futuros devem integrar avaliações *in vivo*, frações fibrosas detalhadas e compostos antinutricionais, visando otimizar a aplicação prática desses recursos.

Conclusão

Este estudo demonstra que as partes vegetais de espécies forrageiras e não convencionais da Caatinga apresentam ampla variabilidade bromatológica e mineral, fortemente influenciada pela função e estrutura do órgão vegetal. As principais novidades incluem a identificação de folhas e estruturas reprodutivas como fontes relevantes de proteína, energia e macrominerais metabólicos, enquanto caules e raízes se destacam pelo alto teor de matéria seca, fibra e matéria orgânica, e as cactáceas pelo expressivo acúmulo mineral, especialmente de cálcio, manganês e ferro. A abordagem integrada, combinando mapas de calor, PCA e correlações de Pearson, permitiu elucidar padrões consistentes de distribuição nutricional e coacumulação de nutrientes. Esses achados reforçam o potencial das espécies da Caatinga como recursos estratégicos para sistemas produtivos em regiões semiáridas e fornecem uma base científica sólida para usos direcionados dessas biomassas, contribuindo para a valorização e o manejo sustentável da biodiversidade regional.

Referências

- AOAC. Official methods of analysis. 21st ed. Gaithersburg: AOAC International, 2019.
- Araujo Filho, J. A.; Carvalho, F. C. Desenvolvimento sustentado da caatinga. Sobral: EMBRAPA-CNPC, 1997. 19 p. (EMBRAPA – CNPC. Circular Técnica, 13).
- Duque, J. G. Solo e água no polígono das secas. 5 a ed., Fortaleza – CE: ESAM, Fundação Guimarães Duque, 1980b.

- Jacob, F. F., Striegel, L., Rychlik, M., Hutzler, M., & Methner, F.-J. (2019). Spent yeast from brewing processes: A biodiverse starting material for yeast extract production. *Fermentation*, 5(2), 51. <https://doi.org/10.3390/fermentation5020051>
- Luetzelburg, P. V. Estudo Botânico do Nordeste . Rio de Janeiro, MVOP- Instituto Federal de Obras contra as Secas, 1923, v. 3, p.134. (Publicação, 57, série I.A.).
- Melo, A. L. Estudos taxonômicos sobre o gênero *Cnidocolus* Pohl (Crotonoideae- Euphorbiaceae) no estado de Pernambuco – Brasil. Recife, 2000. 153p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2000.
- Moreira, E., Targino, I. Capítulos de Geografia Agrária da Paraíba. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 1997. 332p.
- Ratsewo J, Meeso N, Siriamornpun S. Changes in amino acids and bioactive compounds of pigmented rice as affected by far-infrared radiation and hot air drying. *Food Chem.* 2020 Feb 15;306:125644. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125644>
- Ravindran, R., Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. *Bioengineering*, 5(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093>
- Ribeiro-Filho N, Akepach P, Sanchez de Alsina OL (2021) Hygroscopicity and isosteric heat of cashew Apple waste, non-fermented and fermented. *Food Bioscience* 42:101103. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101103>
- Sampaio, E. V. S. B.; Giulietti, A. M.; Virginio, J.; Rojas, C. F. L. G. Vegetação & Flora da Caatinga - Associação Plantas do Nordeste – APNE, Centro Nordestino de Informações sobre Plantas – CNIP, Recife, PE, 2002. 176p.
- Samyori, D.; Das, A. B.; Deka, S. C. Pigmented rice: a potential source of bioactive compounds – a review. *International Journal of Food Science & Technology*, v.52, n.5, p.1073–1081, 2017. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13378>
- Tabarelli, M.; Silva, J. M. C; Santos, A. M. M.; Vicente, A. Análise de representatividade das unidades de conservação de uso direto e indireto na Caatinga: Análise Preliminar. In: Silva, J. M. C; & Tabarelli, M. (coord). Workshop Avaliação e Identificação de Ações Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios do Bioma Caatinga. Petrolina, PE. www.biodiversitas.org.br/caatinga, 2000.
- Wang, W.; Li, Y.; Dang, P.; Zhao, S.; Lai, D.; Zhou, L. Rice secondary metabolites: structures, roles, biosynthesis, and metabolic regulation. *Molecules*, v.23, n.12, 3098, 2018. <https://doi.org/10.3390/molecules23123098>