



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.5.3.2020.3096.319-328



Composição mineral da palma forrageira variedade baiana sob níveis de reposição de água no solo

Mineral composition of forage cactus baiana under water replenishment levels the soil

Renner Luciano de Souza Ferraz^a, José Dantas Neto^a, Patrícia da Silva Costa^a, Antônio Suassuna de Lima^a, Patrícia Ferreira da Silva^a, Rigoberto Moreira de Matos^a

^a Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Bodocongó, Campina Grande, Paraíba, Brasil. CEP: 58109-970. E-mail: ferragroestat@gmail.com, zedantas1955@gmail.com, patriciagroambiental@gmail.com, suassunaagro@gmail.com, patrycyafs@yahoo.com.br, rigobertomoreira@gmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido 15 Jan 2020
Aceito 28 Ago 2020
Publicado 28 Ago 2020

ABSTRACT

The increased consumption of water resources and fertilizers for fertigation evidences the need to grow vegetables with greater efficiency of the use of water and nutrients. The objective of this study was to evaluate the mineral composition of forage cactus 'Baiana' variety and to identify the most important nutrients to show differences between levels of soil water replenishment. The field experiment was conducted in randomized blocks with five reference evapotranspiration replacement levels (25, 50, 75, 100, and 125% of ETo) and three replications. N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, Cl, Na, and B contents were determined. The mineral composition of forage cactus 'Baiana' variety can be optimized from water soil, to obtain adequate nutritional balance for higher productivity. The 75% replacement level of ETo provided a better balance between the nutrients in the cladodes. The levels of Ca, Mg, Mn, Cl, S, N, Na, Zn, and B are the most relevant to show differences between levels of soil water replacement in the soil and climatic conditions of the Brazilian semi-arid region.

Keywords: *Nopalea cochenillifera*, irrigation, nutrition.

RESUMO

O aumento do consumo de recursos hídricos e fertilizantes para fertirrigação evidencia a necessidade de cultivar vegetais com maior eficiência do uso de água e nutrientes. Objetivou-se avaliar a composição mineral da palma forrageira variedade 'Baiana' e identificar os nutrientes mais relevantes para evidenciar diferenças entre níveis de reposição de água no solo. O experimento de campo foi conduzido em blocos casualizados, com cinco níveis de reposição da evapotranspiração de referência (25, 50, 75, 100 e 125% da ETo) e três repetições. Foram determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, Cl, Na e B. A composição mineral da palma forrageira 'Baiana' pode ser otimizada a partir do manejo de água no solo, de modo a ser obter balanço nutricional adequado para maior produtividade. O nível de reposição de 75% da ETo proporcionou maior equilíbrio entre os nutrientes nos cladódios. Os teores de Ca, Mg, Mn, Cl, S, N, Na, Zn e B são os mais relevantes para evidenciar diferenças entre níveis de reposição de água no solo nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro.

Palavras-Chave: *Nopalea cochenillifera*, irrigação, nutrição.

Introdução

Mundialmente, inúmeras discussões têm sido geradas a respeito das mudanças climáticas e sua influência sobre a vida na Terra (Hickel, 2020).

O fato é que a variabilidade climática promove alteração na temperatura do ambiente e no regime de chuvas, refletindo-se em instabilidade no rendimento das culturas (Liu & Song, 2020;

Prabnakorn et al., 2018). A escassez hídrica e a redução da qualidade da água evidenciam o uso intensivo deste recurso nos processos produtivos, sobretudo na agricultura irrigada, para a garantia da segurança alimentar no planeta (Molina-Navarro et al., 2018).

Atualmente, quase metade das áreas agrícolas dos países em desenvolvimento está localizada em regiões áridas e semiáridas, nas quais a água de irrigação é essencial. Contudo, a escassez do recurso e limitações na obtenção de água de boa qualidade têm impulsionado o aumento da sua utilização, com elevados níveis de salinidade na irrigação. Isto caracteriza um cenário recorrente em regiões áridas e semiáridas (Xue et al., 2018), como no Nordeste do Brasil, onde o clima semiárido é predominante, com chuvas esparsas no tempo e no espaço (Martins et al., 2018).

Essas informações ressaltam a importância de estratégias de convivência com as características edafoclimáticas do semiárido. Neste sentido, o cultivo de plantas adaptadas consiste em alternativa eficiente para a produção em ambientes restritivos. As plantas que utilizam o metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) são tolerantes aos estresses abióticos, o que se justifica pela elevada eficiência na fixação de CO₂ e associação com microrganismos benéficos na rizosfera (Citlali et al., 2018).

Dentre as plantas CAM adaptadas ao semiárido, a palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* Salm – Dyck) merece destaque, notadamente por sua expressiva importância como matéria prima para a indústria, forragem para os rebanhos e na alimentação humana, sobretudo devido à sua composição química com nutrientes minerais, gorduras, carboidratos, fibras, energia, ácidos graxos e antioxidantes (Santiago et al., 2018).

A palma forrageira expressa incremento significativo de produtividade em função da densidade de plantio e tratos culturais, sobretudo adubação e irrigação. De fato, em cultivo adensado (40.000 plantas ha⁻¹) de palma forrageira ‘Miúda’, constatou-se que incrementos de nitrogênio (N) e

fósforo (P) promovem ganhos expressivos de produtividade e redução dos teores de N e P nos cladódios, evidenciando a necessidade de avaliação da composição mineral da cultura em cultivos adubado e irrigados (Souza et al., 2017).

A irrigação e a adubação promovem aumento de produtividade de palma forrageira em ambientes com restrição hídrica e limitação nutricional no solo. Contudo, a reposição de água no solo e sua absorção promovem acúmulo de fitomassa e aumento da demanda por nutrientes pela planta. Neste contexto, a relação entre níveis de reposição hídrica e nutrientes absorvidos pelas plantas pode ser obtida utilizando-se a Análise exploratória de Componentes Principais (ACP), que consiste na combinação linear entre as variáveis originais e pode ser complementada pela Análise de Agrupamento Hierárquico, que consiste na aglomeração de tratamentos com efeitos semelhantes (Hair et al., 2009).

O estudo objetivou avaliar a composição mineral de cladódios da palma forrageira, variedade ‘Baiana’, e identificar os nutrientes mais relevantes para evidenciar diferenças entre níveis de reposição de água no solo nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido no período compreendido entre maio de 2015 e dezembro de 2016, em condições de campo, localizado na fazenda Poço Redondo, município de Santa Luzia, microrregião do Seridó ocidental paraibano, latitude 06° 52’ 27’’ S, longitude 36° 56’ 00’’ WGr, e altitude de 299 m.

O clima da região é do tipo Bsh-Tropical, quente seco, semiárido com chuvas de verão, conforme classificação de Köppen. Anualmente, a média de precipitação pluviométrica da região é de 500 mm, com temperatura mínima de 22,3 °C, média de 27,6 °C, máxima de 33,0 °C e umidade relativa do ar variando entre 50 e 70%. Durante a condução do experimento, as variáveis meteorológicas foram monitoradas e expressas em climograma (Figura 1).

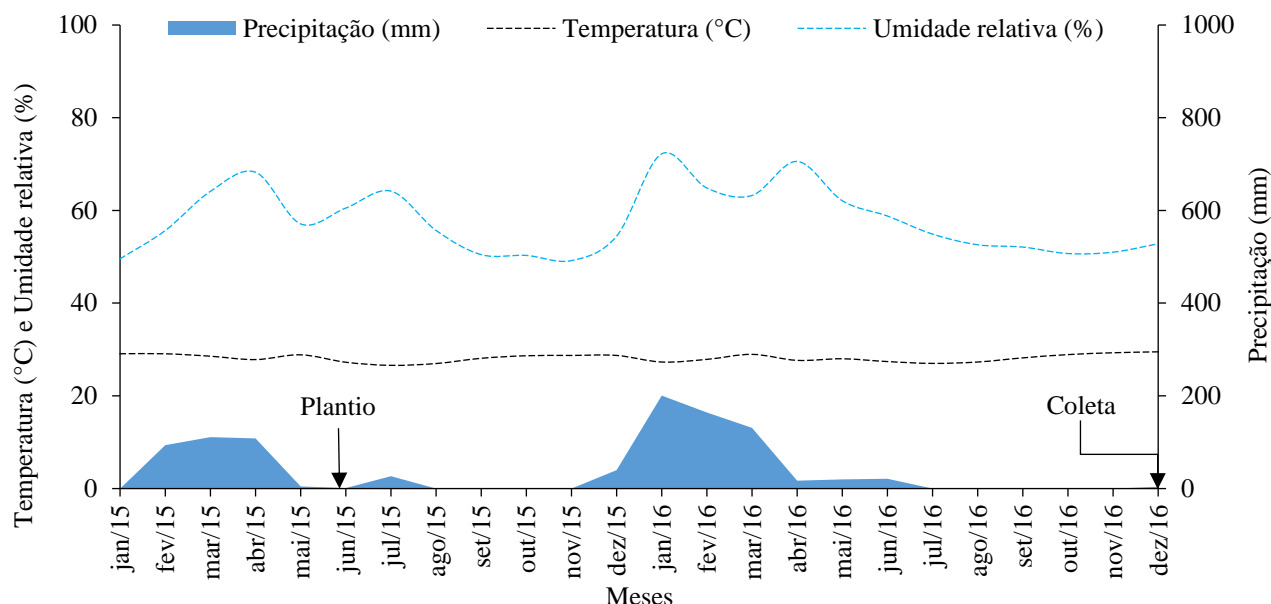


Figura 1. Climograma das variáveis meteorológicas registradas durante o período de condução do experimento. Fonte: Ferraz et al. (2020).

O solo da área experimental foi classificado, conforme a textura, como Franco-arenoso. Para tanto, foram coletadas amostras simples nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, as quais foram homogeneizadas, acondicionadas em sacos plásticos e transportadas

ao Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para caracterização química e físico-hídrica (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Caracterização química do complexo sortivo e extrato de saturação do solo da área experimental em duas profundidades. Fonte: Ferraz et al. (2020).

Profundidade (m)	Complexo Sortivo											
	pH ¹	MO	N	P	K	Ca	Mg	Na	H ⁺	Al ³⁺	SB	CTC
	%									cmolc dm ⁻³
0,00-0,20	5,83	0,38	0,02	4,75	0,60	4,18	2,48	0,17	0,18	0,00	7,43	7,61
0,20-0,40	6,15	0,22	0,01	4,78	0,63	4,65	2,86	0,51	0,15	0,00	8,65	8,80

Profundidade (m)	Extrato de Saturação									
	pH ¹	Cl	CO ₃	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na	CEes	RAS
									dS m ⁻¹
0,00-0,20	5,44	7,50	0,00	9,90	5,12	1,50	3,70	2,37	1,14	1,30
0,20-0,40	5,70	19,50	0,00	9,90	9,87	3,00	14,08	5,96	2,86	2,35

¹ = pH em água; MO = matéria orgânica; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; CEes = condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; RAS = razão de adsorção de sódio.

Tabela 2. Caracterização físico-hídrica do solo da área experimental em duas profundidades. Fonte: Ferraz et al. (2020).

Profundidade (m)	Areia	Silte	Argila	n	DS	DP	U-0,1	U-0,3	U-1,0	U-5,0	U-10,0	U-15,0	AD
%%%	g cm ⁻³%%%%%%	
0,00-0,20	74,83	17,28	7,89	44,23	1,47	1,39	18,56	12,10	9,34	5,15	4,88	4,44	7,66
0,20-0,40	67,71	18,30	13,99	46,48	1,39	2,60	20,14	14,79	10,28	6,29	6,01	5,39	9,40

n = porosidade; DS = densidade do solo; DP = densidade de partícula; U = umidade do solo entre 0,1 e 15 atmosfera; AD = água disponível no solo.

A água utilizada para irrigação durante o experimento foi monitorada quanto à composição química. Para tanto, a cada três meses foram coletadas amostras de água proveniente de um poço Amazona, distante 80 m da área

experimental. As amostras foram transportadas para o LIS/CTRN/UFCG, sendo obtidos os seguintes dados médios de composição química da água: pH = 7,48, Ca = 2,21 meq L⁻¹, Mg = 2,98 meq L⁻¹, Na = 8,44 meq L⁻¹, K = 0,56 meq L⁻¹, CO₃ =

0,64 meq L⁻¹, HCO₃ = 3,25 meq L⁻¹, Cl = 11,47 meq L⁻¹, sulfatos = presentes, razão de adsorção de sódio - RAS = 5,24 meq L⁻¹ e condutividade elétrica - CEa = 1,37 dS m⁻¹, sendo classificada como C₃S₁, conforme classificação do United States Salinity Laboratory – USSL.

O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, com cinco tratamentos constituídos de níveis de reposição da evapotranspiração de referência (25, 50, 75, 100 e 125% da ETo), com três repetições. Cada parcela possuía área de 14,4 m², constituída de uma fileira dupla, com espaçamento de 0,4 m entre linhas; 2,0 m entre fileiras duplas e 0,25 m entre plantas com 5 m de comprimento e 1 m de bordadura, adotando-se área útil de 0,6 m² na parcela, totalizando 216 m².

A partir da análise de fertilidade do solo, foi realizada adubação orgânica com 1,0 kg de esterco bovino por metro linear. Seguindo recomendação de Santos et al. (2006), foi realizada adubação fosfatada com 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e potássica com 65 kg ha⁻¹ de K₂O, utilizando-se 200 kg ha⁻¹ de monoamônio fosfato (MAP) e 108,33 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl). A adubação nitrogenada foi realizada utilizando-se de 900 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), com 2.000 kg ha⁻¹ de ureia como fonte de N, disponibilizada via fertirrigação mensal, parcelada em 18 meses.

Os propágulos vegetativos foram obtidos de produtores rurais do município de Santarém, PB, em parceria com o Instituto Nacional do Semiárido (INSA). Procedeu-se seleção deste material, optando-se por cladódios uniformes, isentos de pragas e doenças. Após a triagem, os cladódios foram mantidos em ambiente aberto, com luminosidade reduzida, durante sete dias, para desidratação parcial e cicatrização das lesões provocadas por ocasião do corte. O plantio dos cladódios foi realizado no dia 29 de maio de 2015, quando o material propagativo foi disposto nos sulcos de plantio, com a face do cladódio voltada para o nascer do sol, com inclinação de 45° e 50%, em alinhamento bilateral.

Para a reposição dos níveis de ETo, utilizou-se um sistema de irrigação do tipo gotejamento, constituído de tubo gotejador, com espessura da parede de 0,2 mm, diâmetro interno de 16 mm, espaçamento entre gotejadores 0,20 m, pressão nominal de 68,6 kPa, vazão de 6,0 L h⁻¹ m⁻¹, equação do emissor $q = 0,46 \times p^{0,5}$ e a eficiência de aplicação do sistema de 0,96.

O sistema de irrigação foi pressurizado utilizando-se um conjunto motobomba centrífuga de 3 CV. No recalque, foi utilizado um filtro de disco de 2" e, nas linhas laterais (55 m), manômetros do tipo Bourdon testados e aferidos

antes das irrigações. No início da área experimental, foi instalado um hidrômetro para a contabilização da quantidade de água aplicada durante a condução do experimento.

Para cada nível de reposição da ETo, foi quantificada a lâmina líquida de irrigação (La), em mm, levando-se em consideração a fração da lâmina aplicada em cada parcela (LAP), em decimal, e a precipitação efetiva no período (P), em mm, utilizando-se da expressão: $La = (ETo * LAP) - P$. A lâmina bruta (LB) foi calculada a partir da eficiência de aplicação do sistema (Ea), em decimal, utilizando-se a expressão: $LB = La/Ea$. Os valores aplicados na irrigação, em cada tratamento, corresponderam a 111,32, 222,65, 333,98, 445,31 e 556,64 mm, os quais somados à precipitação durante o período chegaram a 578,22, 689,55, 800,88, 912,21 e 1.023,54 mm, respectivamente.

A intensidade de aplicação do sistema de irrigação (Ia), em mm h⁻¹, foi calculada levando-se em consideração o número de emissores (Ne), dois por planta; a vazão dos emissores, 1,21 L h⁻¹, e a área ocupada por planta (A), 0,30 m², utilizando-se a expressão: $Ia = (Ne * q)/A$. O tempo de irrigação (Ti) necessário para a reposição da Eto, em cada tratamento, foi calculado a partir da lâmina bruta (LB), em mm, e da intensidade de aplicação do sistema de irrigação (Ia), em mm h⁻¹, utilizando-se a expressão: $Ti = LB/Ia$.

Transcorridos 540 dias após o plantio (DAP), foram coletados três cladódios de plantas distintas, na área útil de cada parcela, padronizados por peso, tamanho e estágio de desenvolvimento. As amostras foram pesadas para obtenção da massa da amostra fresca (g) e conduzidas ao Laboratório de Engenharia de Irrigação e Drenagem (LEID) do CTRN/UFPA, onde foram cortadas em pedaços, acondicionadas em sacos de papel previamente identificados e conduzidas à estufa de circulação forçada de ar a 60°C até atingirem massa constante. Posteriormente, o material foi pesado, triturado, peneirado, utilizando-se peneiras de 1,0 mm, e armazenados em recipientes hermeticamente fechados.

Os recipientes com as amostras foram transportados ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para análise da composição mineral, expressa por meio dos teores dos macronutrientes, N, P, K, Ca, Mg e S e dos micronutrientes Cu, Fe, Mn, Zn, Cl, Na e B, utilizando-se da metodologia da Embrapa (2009).

Os dados foram padronizados por colunas, de modo a tornar a média de cada variável nula ($\bar{X} = 0,0$) e variância unitária ($S^2 = 1,0$). A estrutura multivariada dos resultados foi avaliada por meio

da Análise exploratória de Componentes Principais (ACP), condensando-se a quantidade de informação relevante contida no conjunto de dados originais em um menor número de dimensões, resultantes de combinações lineares das variáveis originais, geradas a partir dos autovalores mais elevados ($\lambda > 1$) na matriz de covariância, explicando uma porcentagem maior que 10% da variância total (Govaerts et al., 2007).

Apenas variáveis com coeficiente de correlação superior a 0,5 foram mantidas na composição de cada Componente Principal (CP) (Hair et al., 2009). Variáveis não associadas aos CPs ($r < 0,5$) foram removidas do banco de dados padronizado e uma nova análise foi realizada. Utilizando-se dos teores de nutrientes relacionados em cada CP, foi realizada Análise de Agrupamento Hierárquico utilizando-se o método *Ward's minimum variance*. Para o processamento das análises utilizou-se o *software* Statistica v. 7.0.

Resultados e Discussão

Na palma forrageira 'Baiana', a partir da Análise de Componentes Principais (ACP), foi possível condensar o número de variáveis originais

(nutrientes) em dois Componentes Principais (CP₁ e CP₂), os quais juntos retiveram 74,90% da variância total acumulada no experimento. O CP₁ representa 46,56% da variância total e foi formado a partir da combinação linear entre os teores de N, P, Mg, Na, Cl, S, Zn e Fe, enquanto que o CP₂ responde por 28,34% da variância remanescente e foi formado a partir da combinação linear entre os teores de Ca, B, Cu e Mn (Tabela 3). Os teores de K não foram relacionados nos CP₁ e CP₂.

Os teores absolutos de macro e micronutrientes da palma 'Baiana' obtidos em cada nível de reposição da ETo estão relacionados na Tabela 3. Independente do nível de reposição da ETo, a ordem de grandeza de acúmulo de macronutrientes em cladódios da palma 'Baiana', em g kg⁻¹ de matéria seca (MS), foi: Ca (44,98±4,80) > K (34,32±6,59) > N (21,63±2,24) > Mg (20,92±3,58) > P (2,32±0,40) > S (0,08±0,04) e para micronutrientes, em mg kg⁻¹ de MS, a ordem foi: Cl (63588,00±13832,69) > Na (3572,00±656,67) > Mn (859,30±492,80) > Fe (126,22±26,04) > B (116,98±23,28) > Zn (36,42±14,37) > Cu (8,66±2,21).

Tabela 3. Autovalores, variância, coeficientes de correlação entre Componentes Principais e variáveis e teores de nutrientes em cada nível de reposição da ETo na palma forrageira variedade 'Baiana'. Fonte: Ferraz et al. (2020).

CPs	λ	S ² %	Cargas Fatoriais (r)											
			N ¹	P ¹	Ca ¹	Mg ¹	Na ¹	Cl ¹	S ²	B ²	Cu ²	Zn ²	Fe ²	Mn ²
CP ₁	5,59	46,56	-0,74*	0,59*	-0,03	-0,92*	-0,74*	-0,88*	-0,86*	-0,69	-0,46	0,73*	-0,68*	-0,30
CP ₂	3,40	28,34	0,16	-0,57	-0,95*	-0,22	-0,23	0,17	-0,18	-0,71*	0,68*	-0,32	0,28	-0,92*
ETo			Teores de nutrientes											
25%			18,38	2,83	44,55	16,69	3,07	47,70	31,51	93,62	6,70	63,89	77,36	608,62
50%			20,83	2,33	44,55	16,51	2,57	49,76	54,73	99,86	9,34	23,65	152,83	694,76
75%			20,65	2,65	49,50	24,95	3,81	78,44	138,60	150,87	10,18	29,38	140,15	1345,30
100%			23,80	1,72	36,37	23,22	4,06	80,56	89,57	101,56	11,53	28,32	136,14	158,47
125%			24,50	2,06	49,50	23,24	4,35	61,48	72,80	138,97	5,57	36,85	124,60	1489,36

CPs = componentes principais; λ = autovalores; S²% = porção da variância explicada; 1 = médias em g kg⁻¹ de MS; 2 = médias em mg kg⁻¹ de MS; ETo = evapotranspiração de referência; e * = variáveis consideradas no CP; r = 0,10-0,30 (fraca); r = 0,40-0,60 (moderada); r = 0,70-1,00 (forte).

Com base na combinação linear dos teores de nutrientes em cladódios de palma 'Baiana', verificou-se que, no CP₁, valores relativos mais expressivos de N, Cl, Cu e Fe foram obtidos com reposição de 100% da ETo; enquanto maiores teores relativos de Mg, Na e S foram encontrados com reposição de 75% da ETo. Considerando P e

Zn, valores mais expressivos foram evidenciados com reposição de 25% da ETo. No CP₂ observa-se que maior acúmulo relativo de Ca, B e o Mn é obtido com 125% da ETo enquanto maior teor de Cu é obtido sob reposição de 125% da ETo (Figura 2 AB).

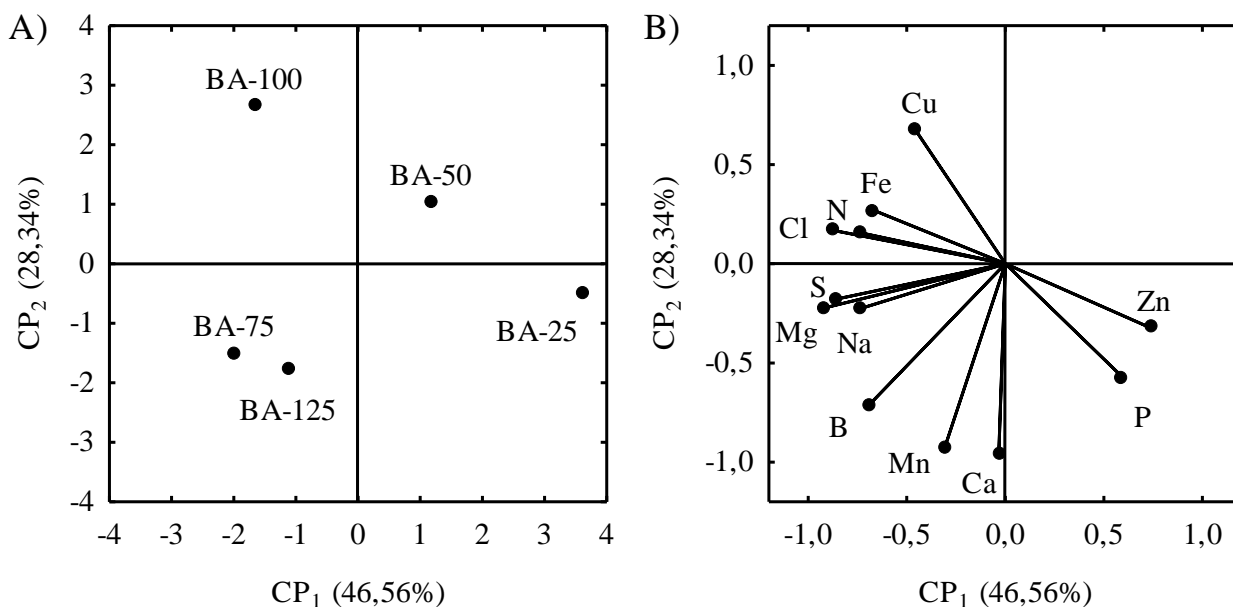


Figura 2. Projeção bidimensional (Biplot) dos níveis de reposição da ETo (A) e correlação de variáveis (B) da palma forrageira ‘Baiana’ nos dois primeiros Componentes Principais (CP₁ e CP₂). Campina Grande, Paraíba (2018). Fonte: Ferraz et al. (2020).

Com base na análise de agrupamento, a partir dos teores relativos dos nutrientes relacionados no CP₁, é possível verificar que os níveis de reposição de 100 e 125% da ETo possuem similaridade entre si, dissimilaridade moderada entre a reposição de 75% da ETo e dissimilaridade elevada entre os níveis de reposição de 50 e 25%

da ETo, de modo que estes dois últimos níveis de reposição são similares entre si (Figura 3A). Para os nutrientes relacionados no CP₂, verificou-se similaridade entre os níveis de reposição de 125 e 75% da ETo, com dissimilaridade entre os níveis de reposição de 100, 50 e 25% da ETo, sendo os dois últimos níveis similares entre si (Figura 3B).

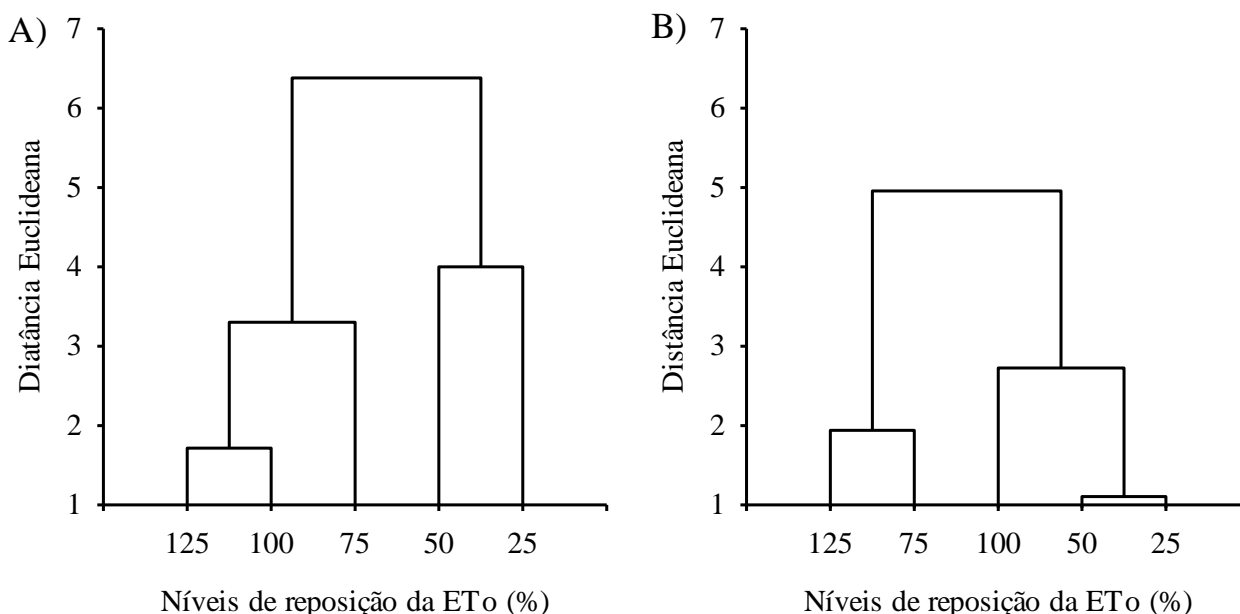


Figura 3. Dendrogramas de dissimilaridade entre os níveis de reposição da ETo a partir dos nutrientes relacionados no primeiro (A) e segundo (B) Componentes Principais. Campina Grande, Paraíba (2018). Fonte: Ferraz et al. (2020).

Os teores clássicos de macronutrientes, em g kg⁻¹ de matéria seca, da palma forrageira ‘Baiana’ (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) relatados

na literatura, são: N (6,7-10,5), P (1,0-1,6), K (8,3-12,1), Ca (20,6-22,5), Mg (10,4-17,0) e S (0,9-1,9). Os teores clássicos de micronutrientes, em mg kg⁻¹

de matéria seca, são: Cu (4,0), Fe (59,0), Mn (430,0), Zn (70,0) e Na (143,0) (Batista et al., 2003; Menezes, Simões & Sampaio, 2005; Santos et al., 2006; Frota et al., 2015).

O acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Na da palma 'Baiana', sob níveis de reposição da ETo e fertirrigação com 900 kg ha⁻¹ de N, foi superior aos valores clássicos relatados na literatura. Este incremento é devido ao maior aporte hídrico e consequente solubilização e disponibilização de nutrientes no solo. De fato, os níveis da ETo repostos mantêm o fluxo hídrico, fundamental para a absorção e o transporte destes nutrientes pelas vias simplástica e apoplástica até os elementos traqueais e vasos xilemáticos (Taiz et al., 2017).

Maior disponibilidade de água e nitrogênio pode ter induzido o crescimento e o desenvolvimento das raízes, isso porque a palma forrageira possui sistema radicular constituído de muitas raízes finas (< 1 mm), distribuídas em rede, localizadas na superfície do perfil do solo (0-20 cm), adaptadas para a absorção da água de chuvas leves e até do orvalho. Assim, maior aporte hídrico pode ter promovido o crescimento de raízes em camadas mais profundas, devido à percolação de água e carreamento de nutrientes para estas zonas (Oliveira et al., 2010). Ressalte-se que, em áreas de clima árido e semiárido, a umidade do solo é geralmente o principal fator que influencia o crescimento radicular (Wilcox et al., 2004)

Os baixos teores de S e redução do acúmulo de P e Zn podem ter ocorrido em função da lixiviação destes nutrientes no solo, notadamente devido ao incremento de água em cada nível de reposição da ETo (Eriksen, Olesen & Askegaard, 2002; Österholm & Aström, 2004; Smanhotto et al., 2010; Costa, Costa & Pereira, 2014). Em sentido complementar, a correlação inversa entre os teores de P e S e os demais nutrientes está associada ao maior acúmulo de fitomassa e à remobilização destes nutrientes, o que caracteriza um efeito de diluição nos tecidos das plantas (Dubeux Júnior et al., 2006).

As informações supracitadas são ratificadas por Snyman (2006) ao constatar que a massa e o comprimento das raízes de palma forrageira tiveram redução significativa com o déficit hídrico, enquanto a relação massa e comprimento de raízes aumentou significativamente. Neste contexto, é possível que o suprimento de água e nitrogênio tenha promovido maior acúmulo de biomassa radicular, bem como estimulado o alongamento de raízes, aumentando a superfície específica para a absorção de nutrientes, o que justifica os elevados teores quantificados

neste estudo (Morgan & Connolly, 2013; Xia et al., 2018).

O baixo teor de P observado com 25% de reposição da ETo pode estar relacionado à sua baixa mobilidade no solo (Santos, Gatiboni & Kaminski, 2008), além da baixa umidade do solo inibir a colonização micorrízica e reduzir a absorção do nutriente, notadamente devido ao menor diâmetro das hifas dos fungos e consequente diminuição da superfície de contato hifa-solo, convergido para a limitação da capacidade de estocar polifosfatos nos vacúolos (Santos, 2018).

É possível que os aumentos nos teores de Na e Cl tenham ocorrido em função da escassez de chuvas durante os cinco meses que antecederam a coleta de material vegetal para análise e dos incrementos de água de irrigação, isso porque a água utilizada possuía salinidade alta, classificada como (C₃), e baixo risco de sodicidade (S₁). Ressalte-se que o acúmulo dos íons Na⁺ e Cl⁻ em excesso pode causar redução dos teores de pigmentos cloroplastídicos, danos aos sistemas de membranas e diminuição da eficiência quântica do fotossistema II, isso justifica a reposição de 125% da ETo para a lixiviação destes elementos no perfil do solo explorado pelas raízes (Luna et al., 2013; Lima et al., 2015; Arias-Moreno et al., 2017).

Com base nas correlações entre os Componentes Principais e os teores de nutrientes, verificou-se que, em ordem de relevância, os teores de Ca, Mg, Mn, Cl, S, N, Na, Zn e B expressaram coeficientes de correlação (r) de -0,95 > -0,92 > -0,92 > -0,88 > -0,86 > -0,74 > -0,74 > 0,73 > 0,71, respectivamente, indicando alta associação com os CPs e foram os constituintes da composição mineral de cladódios da palma forrageira 'Baiana' mais relevantes para evidenciar diferenças entre níveis de reposição de água no solo, nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro. Os teores de Cu, Fe e P tiveram correlação moderada com os CPs, com coeficientes de correlação de 0,68 > -0,68 > 0,59, respectivamente.

As correlações evidenciadas neste estudo são importantes para auxiliar na tomada de decisões em estudos futuros visando quantificar o nível ideal de reposição de água no solo, notadamente porque foi possível reduzir o número de variáveis originais necessárias para a explicação da influência da reposição hídrica na composição nutricional da palma forrageira 'Miúda'. De fato, a partir das cargas fatoriais, é possível identificar e selecionar variáveis com maior relevância para a observação do efeito (Liu et al., 2017). Em estudo com palma forrageira, Erre et al. (2009) utilizaram a ACP para a redução de dimensões de dados originais e seleção de variáveis relevantes.

Em pesquisa para a caracterização físico-química de cactos das espécies *Opuntia dillenii* e *Opuntia ficus-indica*, a partir de 23 variáveis originais, Méndez et al. (2015) utilizaram-se de fatores gerados a partir de ACP para a redução do elevado número de variáveis. Estes autores verificaram a necessidade de utilização de cinco fatores ($\lambda > 1,00$) para explicarem 81,40% da variância total, onde o primeiro fator explicou 39,70% e o segundo 21,10%. Neste estudo, menor número de dimensões (dois CPs) para explicar as diferenças entre níveis de reposição da ETo está associado ao menor número de variáveis originais inseridas na análise, implicando em maior objetividade nos resultados.

A análise de Agrupamento permitiu uma visualização simplificada do efeito dos níveis de reposição da ETo, facilitando a identificação da quantidade de água a ser repostada para que ocorra melhor balanço nutricional, a partir de maior relação entre os elementos químicos quantificados. Neste contexto, Hair et al. (2009) reportam que esta análise é utilizada para a simplificação da visualização de resultados. De fato, Santos et al. (2018) utilizaram-se de análise de agrupamento para simplificar a separação de genótipos de palma forrageira, em função dos valores nutricionais, evidenciando praticidade deste tipo de análise.

Conclusão

A composição mineral da palma forrageira ‘Baiana’ pode ser otimizada a partir do manejo de água no solo, de modo a obter balanço nutricional adequado para uma maior produtividade.

O nível de reposição de 75% da ETo proporcionou maior equilíbrio entre os nutrientes nos cladódios da palma forrageira ‘Baiana’.

Os teores de Ca, Mg, Mn, Cl, S, N, Na, Zn e B da palma forrageira ‘Baiana’ são os mais relevantes no estudo para evidenciar diferenças entre níveis de reposição de água no solo, nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa de doutorado do primeiro autor e fomento ao projeto de pesquisa (nº481294/2013-9).

Referências

Arias-Moreno, D. M.; Jiménez-Bremont, J. F.; Maruri-López, I.; Delgado-Sánchez, P. 2017. Effects of catalase on chloroplast arrangement in *Opuntia streptacantha*

chlorenchyma cells under salt stress. *Scientific Reports*, 7, (1), 8656.

- Batista, A. M. V.; Mustafa, A. F.; McAllister, T.; Wang, Y.; Soita, H.; McKinnon, J. J. 2003. Effects of variety on chemical composition, in situ nutrient disappearance and in vitro gas production of spineless cacti. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, (3), 440-445.
- Citlali, F. G.; Desgarenes, D.; Flores-Núñez, V. M.; Partida-Martínez, L. P. 2018. The microbiome of desert CAM plants: lessons from amplicon sequencing and metagenomics. In: Nagarajan, M. (Ed.). *Metagenomics: Perspectives, Methods, and Applications*. Amsterdam: Elsevier, pp. 231-254.
- Costa, L. A. de M.; Costa, M. S. S. de M.; Pereira, D. C. 2014. Lixiviação do fósforo do solo por meio de adubos fosfatados e palhas de plantas de cobertura. *Revista Varia Scientia Agrárias*, 4, (1), 23-37.
- Dubeux Júnior, J. C. B.; Santos, M. V. F. dos; Lira, M. de A.; Santos, D. C. dos; Farias, I.; Lima, L. E.; Ferreira, R. L. C. 2006. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., under different N and P fertilization and plant population in North-east Brazil. *Journal of Arid Environments*, 67, (3), 357-372.
- EMBRAPA. 2009. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. revisada e ampliada. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 627p.
- Erre, P.; Chessa, I.; Nieddu, G.; Jones, P. G. 2009. Diversity and spatial distribution of *Opuntia* spp. in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environments*, 73, (12), 1058-1066.
- Eriksen, J.; Olesen, J. E.; Askegaard, M. 2002. Sulphate leaching and sulphur balances of an organic cereal crop rotation on three Danish soils. *European Journal of Agronomy*, 17, 1-9.
- Frota, M. N. L. da; Carneiro, M. S. de S.; Carvalho, G. M. C.; Araújo Neto, R. B. de. 2015. Palma forrageira na alimentação animal. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 47p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 233).
- Govaerts, B.; Sayre, K. D.; Lichter, K.; Dendooven, L.; Deckers, J. 2007. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Plant and Soil*, 291, 39-54.
- Hair, F. J.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. 2009. *Análise Multivariada de Dados*. 6. ed. Tradução

- Adonai Schlup Sant'Anna. Porto Alegre, RS: Bookman, 688p.
- Hickel, J. 2020. The sustainable development index: Measuring the ecological efficiency of human development in the anthropocene. *Ecological Economics*, 167, 106331.
- Lima, G. S. de; Nobre, R. G.; Gheyi, H. R.; Soares, L. A. dos A.; Pinheiro, F. W. A.; Dias, A. S. 2015. Crescimento, teor de sódio, cloro e relação iônica na mamoneira sob estresse salino e adubação nitrogenada. *Comunicata Scientiae*, 6, (2), 212-223.
- Liu, Y.; Song, W. 2020. Modelling crop yield, water consumption, and water use efficiency for sustainable agroecosystem management. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119940.
- Liu, Z.; Song, R.; Zeng, D.; Zhang, J. 2017. Principal components adjusted variable screening. *Computational Statistics & Data Analysis*, 110, 134-144.
- Luna, N. R. de S.; Andrade, E. M. de; Crisóstomo, L. A.; Meireles, A. C. M.; Aquino, D. do N. 2013. Dinâmica do nitrato e cloreto no solo e a qualidade das águas subterrâneas do distrito de irrigação Baixo Acaraú, CE. *Revista Agro@mbiente On-line*, 7, (1), 53-62.
- Martins, M. A.; Tomasella, J.; Rodriguez, D. A.; Alvalá, R. C. S.; Giarolla, A.; Garofolo, L. L.; Siqueira Júnior, J. L.; Paolicchi, L. T. L. C.; Pinto, G. L. N. 2018. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, 160, 21-30.
- Menezes, R. S. C.; Simões, D. A.; Sampaio, E. V. S. B. 2005. A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 258p.
- Méndez, L. P.; Flores, F. T.; Martíns, J. D.; Rodríguez, E. M.; Romero, C. D. 2015. Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica*. *Food Chemistry*, 188, 393-398.
- Molina-Navarro, E.; Andersen, H. E.; Nielsen, A.; Thodsen, H.; Trolle, D. 2018. Quantifying the combined effects of land use and climate changes on stream flow and nutrient loads: A modelling approach in the Odense Fjord catchment (Denmark). *Science of The Total Environment*, 621, 253-264.
- Morgan, J. B.; Connolly, E. L. 2013. Plant-soil interactions: nutrient uptake. *Nature Education Knowledge*, 4, (8), 2.
- Oliveira, F. T. de; Souto, J. S.; Silva, R. P. da; Andrade Filho, F. C. de; Pereira Júnior, E. B. 2010. Palma forrageira: adaptação e importância para os ecossistemas áridos e semiáridos. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 5, (4), 27-37.
- Österholm, P.; Aström, M. 2004. Quantification of current and future leaching of sulfur and metals from Boreal acids sulfate soils, Western Finland. *Australian Journal of Soil Research*, 42, 547-551.
- Prabnakorn, S.; Maskey, S.; Suryadi, F. X.; Fraiture, C. de. 2018. Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand. *Science of The Total Environment*, 621, 108-119.
- Santiago, E. D.; Domínguez-Fernández, M.; Cid, C.; Peña, M. P. D. 2018. Impact of cooking process on nutritional composition and antioxidants of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 240, 1055-1062.
- Santos, D. C. dos; Farias, I.; Lira, M. de A.; Santos, M. V. F. dos; Arruda, G. P. de; Coelho, R. S. B.; Dias, F. M.; Melo, J. N. de. 2006. Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia e Nopalea*) em Pernambuco. Recife: IPA, 48p. (IPA. Documentos, 30).
- Santos, D. R. dos; Gatiboni, L. C.; Kaminski, J. 2008. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38, (2), 576-586.
- Santos, R. P. R. 2018. Avaliação da taxa de colonização por fungos micorrízicos arbusculares em solo em consórcio com resíduos de corte de granito e macrófitas aquáticas. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, 7, (2), 690-703.
- Santos, R. D.; Neves, A. L. A.; Santos, D. C.; Pereira, L. G. R.; Gonçalves, L. C.; Ferreira, A. L.; Costa, C. T. F.; Araujo, G. G. L.; Scherer, C. B.; Sollenberger, L. E. 2018. Divergence in nutrient concentration, *in vitro* degradation and gas production potential of spineless cactus genotypes selected for insect resistance. *The Journal of Agricultural Science*, 156, 450-456.
- Smanhotto, A.; Sousa, A. de P.; Sampaio, S. C.; Nóbrega, L. H. P.; Prior, M. 2010. Cobre e zinco no material percolado e no solo com a aplicação de água residuária de suinocultura em solo cultivado com soja. *Engenharia Agrícola*, 30, (2), 346-357.
- Snyman, H. A. 2006. A greenhouse study on root dynamics of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia robusta*. *Journal of Arid Environments*, 65, (4), 529-542.
- Souza, T. C. de; Santos, M. V. F. dos; Dubeux Júnior, J. C. B.; Lira, M. de A.; Santos, D. C. dos; Cunha, M. V. da; Lima, L. E. de; Silva,

- R. R. da. 2017. Productivity and nutrient concentration in spineless cactus under different fertilizations and plant densities. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 12, (4), 555-560.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. 2017. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 888 p.
- Wilcox, C. S.; Ferguson, J. W.; Fernandez, G. C. J.; Nowak, R. S. 2004. Fine root growth dynamics of four Mojave Desert shrubs as related to soil moisture and microsite. *Journal of Arid Environments*, 56, (1), 129-148.
- Xia, C.; Christensen, M. J.; Zhang, X.; Nan, Z. 2018. Effect of *Epichloë gansuensis* endophyte and transgenerational effects on the water use efficiency, nutrient and biomass accumulation of *Achnatherum inebrians* under soil water deficit. *Plant and Soil*, 424, (1-2), 555-571.
- Xue, J.; Huo, Z.; Wang, F.; Kang, S.; Huang, G. 2018. Untangling the effects of shallow groundwater and deficit irrigation on irrigation water productivity in arid region: New conceptual model. *Science of The Total Environment*, 620, 1170-1182.