



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Uso biofertilizantes para intensificação sustentável da produção de palma forrageira irrigada e uso indicadores agrometeorológicos para avaliação

Renan Matheus Cordeiro Leite¹, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim², George do Nascimento Araújo Júnior³, Cleber Pereira Alves⁴, Gabriel Italo Novaes da Silva⁵, Ana Karlla Penna Rocha⁶, Luciana Sandra Bastos de Souza⁷, Thieres George Freire da Silva⁸

¹ Mestrando em Produção Vegetal da Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Av. Gregório Ferraz Nogueira, s/n - José Tomé de Souza Ramos, Serra Talhada, PE, Brasil. CEP: 56909-535, renanmcl@gmail.com. ² Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, alexandremrfj@gmail.com. ³ Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, georgearaujo.agro@gmail.com. ⁴ Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, cleberp.alves@hotmail.com. ⁵ Mestrando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, gabrielitalo.novaes@gmail.com. ⁶ Doutoranda em Geografia da Universidade Estadual de Londrina, Rodovia Celso Garcia Cid, s/n, Londrina, Paraná, Brasil. CEP: 86057-970, karllapenna@hotmail.com. ⁷ Professora Dr. Adjunta I, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. CEP: 56900-000, sanddrbastos@yahoo.com.br. ⁸ Professor Associado II da Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Gregório Ferraz Nogueira, s/n - José Tomé de Souza Ramos, Serra Talhada, PE, Brasil. CEP: 56909-535, thieres.silva@ufrpe.br (autor correspondente).

Artigo recebido em 07/04/2021 e aceite em 03/01/2021.

RESUMO

Atividades agropecuárias no semiárido brasileiro são de grande importância, no entanto, as mudanças do clima e da vegetação vêm ameaçando a segurança alimentar dos rebanhos. Visto que, geralmente os animais são criados de forma extensiva, se alimentando da vegetação nativa da Caatinga. A palma forrageira, por ser uma planta adaptada às condições climáticas dessa região, tornando-se uma alternativa de cultivo, e podendo ter sua produtividade aumentada de forma sustentável com um manejo adequado, além de sofrer alterações nos indicadores agrometeorológicos. A adubação orgânica, por exemplo, pode proporcionar alterações na qualidade, produtividade e estrutura espacial dessa cultura, no entanto, estudos avaliando a interação de clones de palma forrageira com bioestimulantes são escassos na literatura, logo, a aplicação de indicadores agrometeorológicos no cultivo sustentável dessa cultura, torna-se uma ferramenta com grande potencial para avaliação da eficiência dos cultivos e melhorar o planejamento e tomada de decisão dos produtores. O objetivo desse estudo foi apresentar uma revisão sobre a intensificação sustentável da palma forrageira por meio de biofertilizantes e o uso de indicadores agrometeorológicos, sugerindo estudos futuros para avanço técnico e científico e melhoramento na governança agropecuária das propriedades em ambientes semiáridos.

Palavras-chave: bioestimulantes; forragem; pecuária; semiárido; *Opuntia*.

Biofertilizer use for sustainable intensification of irrigated forage cactus production and use agrometeorological indicators for evaluation

ABSTRACT

Agricultural activities in the Brazilian semi-arid region are of great importance, however, climate and vegetation changes have been threatening the food security of livestock. Since, generally the animals are raised extensively, feeding on the native vegetation of the Caatinga. The forage cactus, being a plant adapted to the climatic conditions of this region, becomes an alternative for cultivation, and its productivity can be increased in a sustainable way with an adequate management, in addition to undergoing changes in agrometeorological indicators. Organic fertilization, for example, can provide changes in the quality, productivity and spatial structure of this crop, however, studies evaluating the interaction of forage cactus clones with biostimulants are scarce in the literature, therefore, the application of agrometeorological indicators in the sustainable cultivation of this crop, becomes a tool with great potential for evaluating the efficiency of crops and improving the planning and decision-making of producers. The aim of this study was to present a review on the sustainable intensification of forage cactus through biofertilizers and the use of agrometeorological indicators, suggesting future studies for technical and scientific advancement and improvement in the agricultural governance of properties in semi-arid environments.

Leite, R. M. C.; Jardim, A. M. R. F. J.; Araújo Júnior, G. N.; Alves, C. P.; Silva, G. I. N.; Rocha, A. K. P.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F.

Keywords: biostimulants; forage; livestock; semi-arid; *Opuntia*.

Introdução

O Nordeste do Brasil é uma região que vem passando por mudanças drásticas na vegetação e no clima ao longo das últimas décadas, onde recorrentes eventos de secas podem ser observadas (Barbosa e Kumar, 2016; Silva et al., 2021a). Estas condições podem ser intensificadas em decorrência das mudanças do clima, comprometendo a produção de alimentos e aumentando as desigualdades sociais em regiões mais vulneráveis, decorrente destes fenômenos (FAO, 2020; Félix et al., 2020; Pereira e Nascimento, 2020; Oliveira-Júnior et al., 2021; Jardim et al., 2021a).

As atividades agropecuárias são de grande importância para a subsistência da população rural, no entanto, o baixo nível de tecnificação dos pequenos produtores ocasionam uma redução na produtividade de alimento para os rebanhos (Althoff et al., 2016; Angelotti et al., 2011; Jiménez et al., 2019). Além disso, a utilização de técnicas de menor eficiência no manejo da vegetação nativa (Caatinga), faz com que essa fonte principal de alimento, torne-se insuficiente durante os longos períodos de estiagem (Moraes et al., 2019; Pinheiro et al., 2021), ocasionando também o aumento no êxodo rural (Hinojosa et al., 2016). Sendo assim, a utilização de espécies adaptadas e outras práticas de resiliência agrícola são fundamentais para a qualidade e estabilidade da produção.

A palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) é uma boa alternativa para compor os sistemas de cultivo no semiárido brasileiro (SAB), decorrente dos níveis de carboidratos não fibrosos, ser rica em minerais, demonstrar uma boa aceitabilidade, ter baixo custo de produção e possuir o metabolismo ácido das crassuláceas, o que proporciona uma alta eficiência hídrica, promovendo uma boa adaptação as condições climáticas semiáridas e áridas (Dubeux Jr. et al., 2015; Marques et al., 2017; Queiroz et al., 2016; Silva et al., 2015a; Silva et al., 2020; Jardim et al., 2020a).

A utilização de práticas de manejo adequadas é de grande importância para atingir níveis satisfatórios de produtividade desta cultura, por exemplo, Dantas et al. (2017) e Araújo Júnior et al. (2021a) verificaram que a produção de palma forrageira irrigada e adensada no semiárido é viável economicamente. Queiroz et al. (2015) salientaram que o número de cladódios, biomassa verde e seca, em condições irrigadas foram superiores aos observados na literatura, em cultivos de sequeiro, mesmo com ciclos mais longos. No

entanto, sabe-se pouco sobre as respostas dessa cultura quando submetida a fertilização com bioestimulantes.

A adubação orgânica pode proporcionar um incremento no desempenho agrônomo da cultura (Xavier Junior et al., 2021). Donato et al. (2016) verificaram através de um estudo, que o incremento de doses de esterco, potencializa o aumento da altura da planta e comprimento do cladódio de palma. Além disso, o aumento nas doses de esterco de gado na palma aumenta o conteúdo de fósforo, nitrogênio, potássio e enxofre nos cladódios. No entanto, ainda não se compreende os efeitos de bioestimulantes sobre os parâmetros agrometeorológicos e dinâmica de crescimento e produtividade da palma forrageira.

Nesta revisão, objetivou-se avaliar a interação entre os principais clones de palma forrageira, os parâmetros agrometeorológicos e o uso de bioestimulantes como estratégia para proporcionar um cultivo sustentável de forragem e uma melhor segurança alimentar dos rebanhos no semiárido brasileiro, de forma que seja possível sugerir estudos futuros que possam impactar diretamente a governança agropecuária nessas regiões.

Mudanças climáticas e caracterização do semiárido brasileiro

Aproximadamente 37% da população global está localizada em regiões áridas e semiáridas, distribuídas em todos os continentes, que em conjunto representam 40% (53,56 milhões de km²) da extensão territorial do planeta (Gutiérrez et al., 2018). Nesses perímetros, a variabilidade climática é uma característica que aumenta os desafios sociais e econômicos da população, já que eventos climáticos extremos como altas temperaturas e seca, podem ser observados no passado e nas previsões futuras (Costa et al., 2020b; Marengo et al., 2018; Miao et al., 2016; Paredes-Trejo et al., 2017; Queiroz et al., 2020a).

No Brasil, mais de 27,8 milhões de pessoas habitam a região semiárida, correspondendo em uma área de 1.128.697 km², e devido essa densidade populacional é considerada a região semiárida mais populosa do mundo (Ledru et al., 2020).

De acordo com a delimitação do SAB, utilizando os seguintes critérios técnicos:

precipitação média anual igual ou inferior a 800 mm; índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,5; e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, o Ministério da Integração Nacional (2017) destaca que atualmente, o SAB ocupa um espaço geográfico que se estende por nove estados da região Nordeste, mais o Norte de Minas Gerais, abrangendo 1262 municípios que

atendem pelo menos um dos critérios citados anteriormente, onde o estado de Alagoas é detentor da maior área per capita ($76,5 \text{ km}^2 \text{ hab.}^{-1}$) e Minas Gerais possui a menor área per capita ($12,3 \text{ km}^2 \text{ hab.}^{-1}$). Os estados Bahia, Piauí e Minas Gerais, são os únicos com área per capita inferior ao SAB de modo geral ($24,7 \text{ km}^2 \text{ hab.}^{-1}$), com isso, apresentam maior densidade populacional (Tabela 1).

Tabela 1. Extensão territorial, número de habitantes e área per capita do SAB.

Estado	Nº de municípios	Extensão territorial (km^2)	Nº de habitantes	Área per capita ($\text{km}^2 \text{ hab.}^{-1}$)
AL	38	12.583	962.641	76,5
BA	278	446.021	7.675.656	17,2
CE	175	146.889	5.827.192	39,7
MA	2	3.523	213.693	60,7
MG	91	121.256	1.492.198	12,3
PB	194	51.306	2.498.117	48,7
PE	123	86.341	3.993.975	46,3
PI	185	200.610	2.805.394	14,0
RN	147	49.073	1.922.440	39,2
SE	29	11.093	478.935	43,2
Total	1.262	1.128.146	27.870.241	24,7

Fonte: Ministério da Integração Nacional (2017).

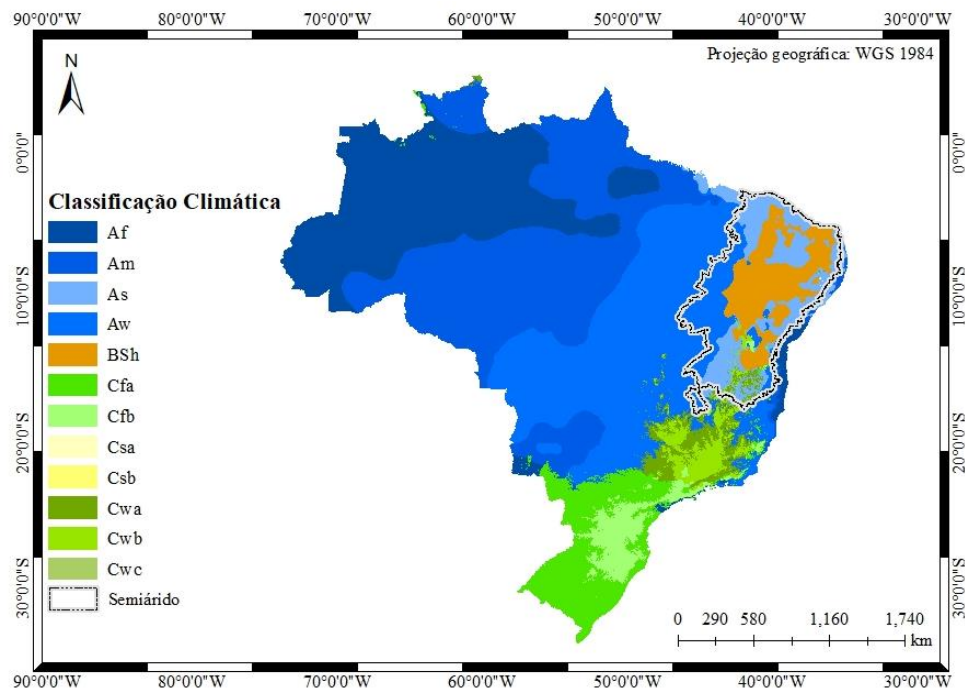


Figura 1. Mapa do Brasil com delimitação geográfica do Semiárido e classificação climática. Fonte: SUDENE, (2021) e Alvares et al. (2013).

O SAB expressa características específicas como temperaturas médias altas ($20,1$ a $32,9 \text{ }^\circ\text{C}$), baixa umidade relativa média do ar (60%), elevada insolação (2.800 h ano^{-1}), precipitações escassas

(200 a 800 mm ano^{-1}) e elevada evapotranspiração potencial média ($2.000 \text{ mm ano}^{-1}$) (Figura 1), o que em conjunto com a grande variabilidade espaço-temporal das chuvas, ocasiona o déficit hídrico em

Leite, R. M. C.; Jardim, A. M. R. F. J.; Araújo Júnior, G. N.; Alves, C. P.; Silva, G. I. N.; Rocha, A. K. P.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F.

boa parte do ano, já que as precipitações pluviométricas se concentram em um curto período de tempo (i.e., aproximadamente 4 meses) (Alves et al., 2018; Ferreira et al., 2009; Paredes-Trejo et al., 2017; Thornthwaite, 1948). Já se observou 48 eventos de seca, sendo 19 com duração de pelo menos dois anos consecutivos (Silva et al., 2021b). Além disso, eventos de seca vêm sendo relacionados ao El Niño–Oscilação Sul e/ou Oscilação Década do Pacífico (Costa et al., 2020a; Marengo et al., 2018), o que pode ocasionar danos ambientais e aumentar a vulnerabilidade socioeconômica da população.

Além disso, as ações antrópicas também ocasionam a diminuição da cobertura vegetal viva e morta dos solos, isso desencadeia o aumento dos processos erosivos, associados a baixa precipitação pluvial, elevada evapotranspiração potencial e a presença de camadas impermeáveis, que favorecem o aumento da concentração de solos salinos e interfere diretamente no desenvolvimento das plantas (Oliveira et al., 2018; Sabino et al., 2021).

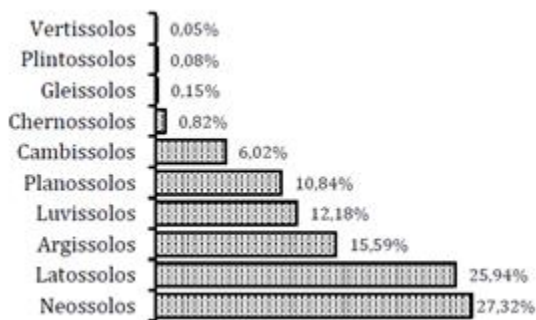


Figura 2. Distribuição das Classes de Solos na região semiárido brasileiro (SAB). Fonte: Gama e Jesus, (2020).

Detentora de uma variedade de espécies endêmicas, composta principalmente por plantas xerófitas, lenhosas, espinhosas, com predominância de árvores e arbustos, a floresta tropical nativa do SAB, denominada “Caatinga”, originalmente ocupa uma área de quase 800.000 km² (Marques et al., 2020). Devido à grande biodiversidade, parte expressiva da biomassa vegetal tem sido usada como produtos florestais (madeira, carvão vegetal, e forragem) e isso vem ocasionando perdas significativas da vegetação (Althoff et al., 2016).

Nessa região, juntamente com a pecuária extensiva, predomina-se o sistema agrícola em sequeiro, executado principalmente por agricultores familiares, cultivando lavouras de subsistência, onde geralmente efetua-se

desmatamento da vegetação nativa para implantação de cultivos (Beuchle et al., 2015; Medeiros et al., 2020). No entanto, a conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas, pode desencadear diversos problemas, como por exemplo: desestruturação do solo, fragmentando os macroagregados e redistribuindo os microagregados (Sá et al., 2014); e redução da cobertura vegetal, aumentando a área desertificada (Vieira et al., 2020).

A população rural do SAB depende diretamente do gado como um componente essencial de sua estratégia de subsistência, onde a pecuária extensiva, que praticam técnicas de menor eficiência no manejo, em que a vegetação nativa da caatinga normalmente é utilizada como fonte de alimento principal em determinadas épocas do ano, desempenha um papel fundamental no gerenciamento da terra (Moraes et al., 2019; Queiroz et al., 2020b), mitigando o abandono e mantendo a população nessas regiões (Simões et al., 2010). No entanto, o suprimento alimentar dos rebanhos é insuficiente durante os longos períodos de estiagem, uma vez que em média apenas 6% da biomassa anual produzida pela caatinga pode ser considerada forragem (Ferreira et al., 2009).

Sob estas condições, espera-se um aumento da vulnerabilidade destes ambientes e da agricultura de subsistência, sendo necessário adotar práticas apropriadas que promovam a resiliência e melhor adaptação aos cenários das mudanças climáticas. Contudo, vários empecilhos dificultam à adaptação e a capacidade produtiva dos pequenos agricultores em adotarem algumas opções de sistemas inteligentes (Awazi et al., 2019).

No Brasil, a agricultura familiar compreende 3,89 milhões de unidades produtivas (77% do total), com 10,1 milhões de pessoas ocupadas, contribuindo expressivamente para a produção de alimentos essenciais da dieta básica da população, além de ter papel preponderante na geração de trabalho rural (IBGE, 2019). As pequenas propriedades são geralmente consideradas mais diversificadas, usam práticas tradicionais, preservam as características da paisagem e usam um horizonte de planejamento mais longo, para que seus filhos herdem uma fazenda em boas condições agrícolas e ambientais (Inwood et al., 2013; Wuepper et al., 2020).

A sucessão agrícola familiar é o tipo predominante de transferência agrícola, no entanto, em algumas regiões, a baixa renovação gerencial está ligada ao êxodo rural (Conway et al., 2017; Cramer et al., 2008; Eistrup et al., 2019; Levers et

al., 2018), principalmente em áreas marginais e menos produtivas, onde a agricultura e a pecuária são fundamentais para a manutenção da população rural (Hinojosa et al., 2016). Além disso, as pequenas propriedades rurais normalmente sofrem com restrições financeiras e de infraestrutura, e apenas uma pequena fração tem acesso a novas práticas de resiliência agrícola, uma vez que, a maioria dos pequenos agricultores buscam conhecimento não tão atualizados de outros produtores locais (García et al., 2020; Jiménez et al., 2019; Wójcik et al., 2019).

Palma forrageira e uso como recurso forrageiro no Semiárido

Algumas plantas com metabolismo ácido das crassuláceas (CAM), representam uma boa

alternativa para compor os sistemas de cultivos das propriedades em regiões semiáridas, isso devido à alta eficiência no uso da água, visto que os estômatos são abertos predominantemente a noite para capturar CO_2 da atmosfera (Jardim et al., 2020b) (Figura 3). Dentre as espécies com esse mecanismo, a palma forrageira apresenta grande importância agropecuária em várias regiões do Brasil e no mundo, possuindo área plantada superior a 600.000 ha (Garcete-Gómez et al., 2017). No mundo a palma é cultivada para consumo humano e uso forrageiro em aproximadamente 1.000.000 ha (Cardador-Martínez et al., 2011), o que evidencia sua grande importância, sendo a cactácea de maior relevância no mundo .

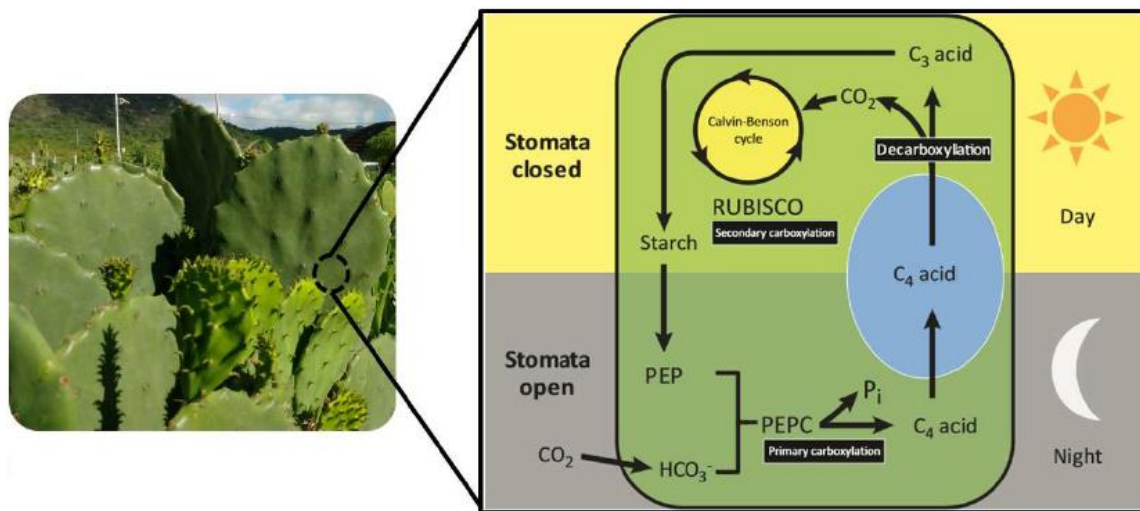


Figura 3. Representação simplificada do metabolismo ácido das crassuláceas em plantas de palma forrageira. Fonte: (Jardim et al., 2020b).

Esta planta é originária do México, e pertence à família Cactaceae, onde foi introduzida no Brasil durante o século XIX com o objetivo de produzir corante oriundo de insetos fêmeas (carmim, proveniente do ácido carmínico), todavia, a ação não foi bem-sucedida. Logo, os estados de Pernambuco e Paraíba sofreram grandes devastações nos palmais, visto que o inseto se tornou praga chave da cultura. No entanto, clones de palma forrageira com resistência ao seu ataque já são difundidos na região para a produção de forragem (Falcão et al., 2013; Jardim et al., 2020b; Vasconcelos et al., 2009).

Os clones Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), Miúda (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e IPA Sertânia

(*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) se sobressaem pela tolerância a cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae*) e sua ampla adaptação, devido suas modificações fisiológicas, anatômicas e estruturais em condições adversas (Marques et al., 2017; Silva et al., 2015a). A palma é utilizada como alimento volumoso para os rebanhos da região, sendo o valor nutricional mais um ponto positivo para alimentação animal. Os níveis de carboidratos não fibrosos são considerados altos, com altos teores de água e mucilagem, com significativa quantidade de minerais com cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg), demonstrando também boa aceitabilidade e baixo custo de produção (Figura 4) (Cardoso et al., 2019; Marques et al., 2017).



Figura 4. Três clones de palma forrageira cultivados no semiárido brasileiro. A) Orelha de Elefante Mexicana; B) Miúda; e C) IPA Sertânia.

O clone Orelha de Elefante Mexicana em termos produtivos, representa o rendimento maior que clones do gênero *Nopalea* (Silva et al., 2015a) (Tabela 2). Esse resultado pode estar associado à maior quantidade de clorênquima, que influencia diretamente na eficiência fotossintética e amplitude do índice de área do cladódio da Orelha de Elefante Mexicana, resultado da maior área de seus cladódios e maior produção de biomassa quando

comparados aos clones do gênero *Nopalea* (Silva et al., 2010). Outro fator relevante, é que devido à alta mortalidade dos clones *Nopalea* em algumas configurações de cultivo com irrigação, faz com que essa eficiência do sistema se torne menor, quando comparado com a *Opuntia* em mesma configuração de plantio (Jardim et al., 2021b; Silva, et al., 2021b).

Tabela 2. Rendimento de forragem de clones de palma forrageira em diferentes sistemas de cultivos.

Clones	Manejo hídrico	MF (Mg ha ⁻¹)	MS (Mg ha ⁻¹)	Densidade de plantas
(Silva et al. 2015a) 745 dias de cultivo				
OEM	Sequeiro	163,0	15,6	31.250 plantas ha ⁻¹
IPA		124,3	10,7	
MIU		117,5	11,5	
(Araújo Júnior et al. 2021b) 567 dias de cultivo				
OEM	Irigado	312,0	31,0	50.000 plantas ha ⁻¹
IPA		83,0	7,0	
MIU		191,0	19,0	
(Silva et al., 2014b) 365 dias de cultivo				
MIU	Sequeiro	118,0	8,5	10.000 plantas ha ⁻¹
MIU		175,0	13,5	20.000 plantas ha ⁻¹
MIU		330,0	24,6	40.000 plantas ha ⁻¹
MIU		639,0	44,7	80.000 plantas ha ⁻¹

OEM - Orelha de Elefante Mexicana, IPA - IPA Sertânia, MIU - Miúda, MF (Mg ha⁻¹) é o rendimento de massa fresca por hectare, e MS (Mg ha⁻¹) é o rendimento de massa seca por hectare.

Porém, as condições climáticas e características físicas e químicas do solo exercem um fator de grande influência no desenvolvimento e crescimento de todas as espécies botânicas, portanto, diferentes sistemas de produção podem afetar no desempenho produtivo, apesar de algumas espécies pertencerem ao mesmo gênero, sendo assim, espécies de palma exibem respostas

diferentes em condições diversificadas de sistemas de cultivo (Queiroz et al., 2016; Silva et al., 2015a).

Irrigação em palma forrageira

Em regiões como o semiárido brasileiro, a prática da irrigação aparece como a alternativa principal para a manutenção da produção agropecuária de forma segura, visto que durante a maior parte do ano existe um déficit hídrico,

dificultando a manutenção dos vegetais durante todo o ano. Em função desse estresse hídrico, as plantas forrageiras ficam submetidas à produtividade cada vez mais limitada, logo, a irrigação torna-se fundamental, uma vez que responde de forma positiva sobre a produção de plantas forrageiras (Pereira et al., 2015; Vitor et al., 2009; Jardim et al., 2021d).

Geralmente a palma forrageira é cultivada em sequeiro, onde a colheita é realizada a cada dois anos. Entretanto, estudos envolvendo o manejo da irrigação em palma, embora a cultura detenha uma baixa exigência hídrica, assim como parâmetros agrometeorológicos para esta forrageira, estão se desenvolvendo no Semiárido brasileiro (Araújo Júnior et al., 2021a; Araújo Júnior et al., 2021b; Jardim et al., 2021b; Araújo Júnior et al., 2021c, Silva, et al., 2021b; Cruz Neto et al., 2017; Lima et al., 2018; Queiroz et al., 2016; Silva et al., 2017).

Queiroz et al. (2015) salientam que distintas lâminas de irrigação não incrementaram a produção de fitomassa da palma (131,16 e 8,18 t ha⁻¹ para matéria fresca e matéria seca, respectivamente), no entanto, essas apresentaram valores superiores aos observados em sequeiro na literatura, mesmo em um ciclo de apenas 380 dias.

Devido à instabilidade climática da região, a agricultura de sequeiro representa alto risco econômico para o produtor no semiárido. Contudo, torna-se necessário considerar que somente 2 a 3% do Semiárido brasileiro apresenta aptidão para irrigação, levando-se em conta a baixa disponibilidade e qualidade da água, assim como limitações do meio edáfico (Dubeux Jr. et al., 2010). Logo, a irrigação mínima e regular torna-se de extrema importância para diminuir os impactos da irrigação com água de baixa qualidade, para isso, torna-se necessário o conhecimento do coeficiente de cultivo (kc) da cultura (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de coeficiente de cultivo (kc) recomendados para palma forrageira.

Fase	Comprimento (dias)*	Descrição	kc
Inicial	60	Plantio e estabelecimento de safra.	0,26
Crescimento	210	Formação de dossel com emissão de cladódios de 1ª e 2ª ordem.	0,26 a 0,52
Intermediário	240	Emissão significativa de cladódios de 3ª ordem ou superior).	0,52
Final	60	Redução significativa de emissão de cladódios.	0,52 a 0,26

*Valores dependentes das condições climáticas locais, da cultivar e do manejo adotado pelo agricultor. Fonte: Silva et al. (2017).

Sistemas de cultivos com palma forrageira irrigada vêm se mostrando economicamente viável em regiões semiáridas. Dantas et al. (2017), constataram que um cultivo de palma adensada (50.000 plantas ha⁻¹) com sistema de irrigação por gotejamento, torna-se viável economicamente quando a produtividade é superior à 150 t ha⁻¹ e o preço por kg é maior que R\$ 0,05.

Biofertilizantes para intensificação e sustentabilidade da produção

A população mundial vem crescendo gradativamente ao longo dos anos. No período de 1950 até 2019 o número de habitantes no planeta passou de 2,5 bilhões para 7,7 bilhões de pessoas, podendo atingir 9,7 bilhões de habitantes até o ano de 2050, e projeções de 10,9 bilhões em 2100 (ONU, 2019).

Por esse motivo, a demanda por alimentos também tem comportamento semelhante, tornando-se cada vez mais importante a produção

animal e a utilização de práticas de intensificação da produção agrícola, de forma que as demandas atuais e futuras da população sejam atendidas (FAO, 2018, 2020; Tilman et al., 2002). No entanto, a disponibilidade per capita de terras aráveis diminui continuamente ao longo das décadas (0,41 ha em 1961 a 0,25 ha em 2015 e até 2050 estima-se em 0,20 ha), o que vem tornando este desafio cada vez mais difícil (Sarkar et al., 2020).

Os efeitos da degradação da terra na produtividade de alimentos, podem às vezes ser compensados pelo aumento da fertilização. Atualmente a aplicação mundial anual de fertilizantes atinge 180 milhões de toneladas (Mt) (N+P₂O₅+ K₂O), com a maior demanda de N (110 Mt) (Heffer e Prud, 2015; Watts et al., 2017). Porém, as entradas de fertilizantes químicos excessivos nos sistemas agrícolas contribuem para as emissões do óxido nitroso, eutrofização de recursos hídricos, aumentando a emissão dos gases

de efeito estufa na atmosfera (Harrison et al., 2019; Tilman et al., 2002; Withers et al., 2014).

Na agricultura sustentável, utilizam-se práticas que atendem às necessidades sociais atuais e futuras de alimentos, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às próprias necessidades. Sistemas agrícolas sustentáveis visam desenvolver novas práticas agrícolas que são seguras e não degradam o meio ambiente (Mohamed et al., 2014; Triviño-Tarradas et al., 2020; Velten et al., 2015). Agricultura sustentável de baixo insumo, torna-se viável por ser um sistema agrícola capaz de produzir alimentos e fibras de forma lucrativa por tempo indeterminado, sem prejudicar a qualidade dos recursos naturais, garantindo práticas seguras para o fornecimento de alimentos nutritivos (Sarkar et al., 2020).

O uso de biofertilizante fornece substâncias húmicas ao solo que podem incrementar a absorção de alguns elementos, melhorando diretamente o agroecossistema, potencializando o desenvolvimento das plantas e consequentemente sua produtividade. Além disso, minimiza os efeitos da acidez do solo devido à capacidade de retenção de bases, pela formação de complexos orgânicos e pelo desenvolvimento de cargas negativas (Galbiatti et al., 2011; Sousa et al., 2008), desempenhando um papel significativo na sustentabilidade agrícola. Utilizar resíduos oriundos dos sistemas de produção animal da propriedade, possibilitando a redução total ou parcial de fertilizantes sintéticos e reduzindo os custos de produção (Ji et al., 2020; Silva et al., 2015b; Yadav et al., 2018).

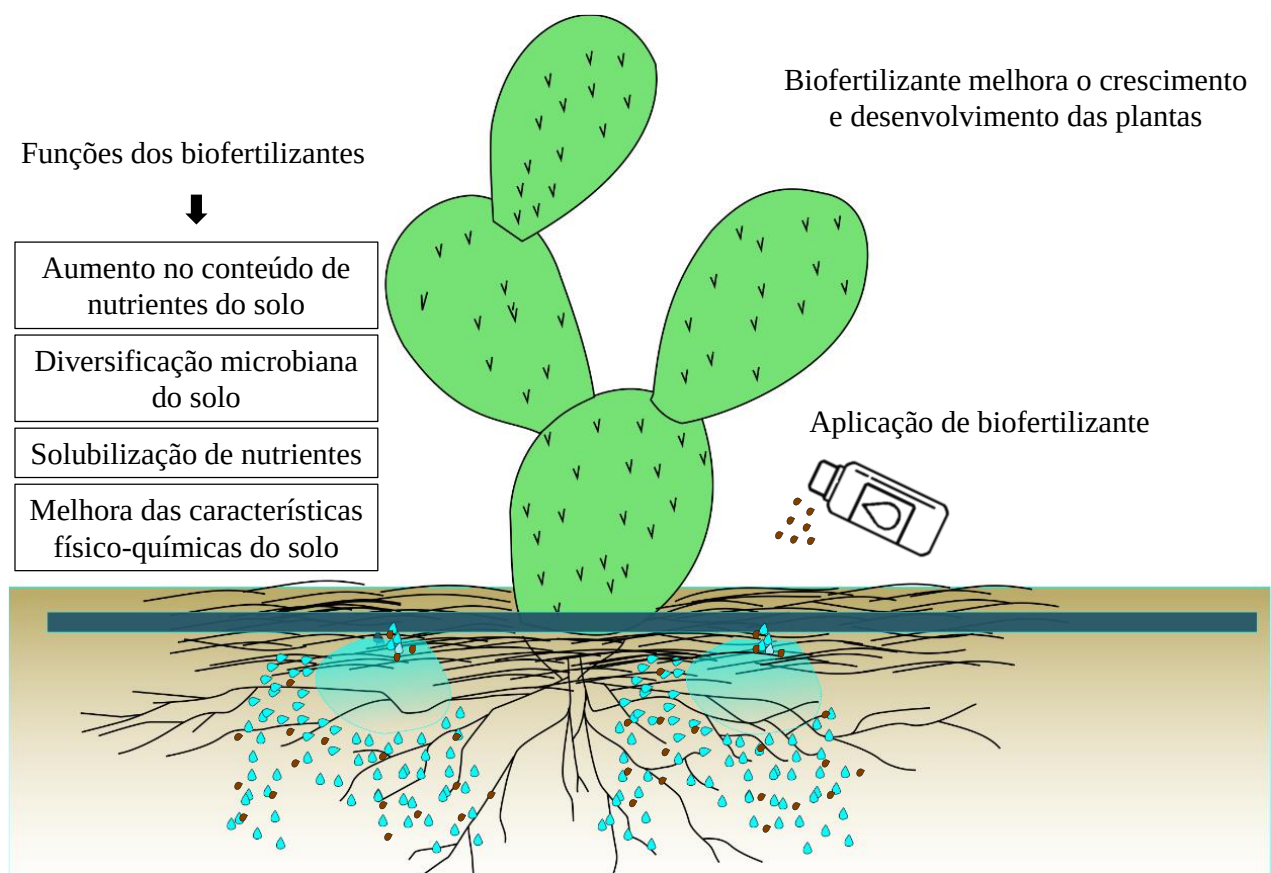


Figura 5. Papel dos biofertilizantes no crescimento das plantas.

No semiárido brasileiro, a pecuária é a atividade principal na maioria das propriedades, sendo 92% do rebanho caprino nacional alocado na região Nordeste, no entanto, devido às características climáticas a produção de biomassa normalmente é baixa (< 5 toneladas de MS por ha por ano), com baixo potencial forrageiro (< 1 tonelada de MS por ha por ano) (Aquino et al.,

2016; Dubeux Jr. et al., 2015; Moraes et al., 2019; Queiroz et al., 2020a).

Diante disso, é comum o uso de palma forrageira para assegurar a alimentação dos animais durante os períodos de maior estiagem, uma vez que a palma apresenta uma alta eficiência no uso da água devido ao metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) (Silva et al., 2015a). Porém, as características morfológicas e o rendimento

Leite, R. M. C.; Jardim, A. M. R. F. J.; Araújo Júnior, G. N.; Alves, C. P.; Silva, G. I. N.; Rocha, A. K. P.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F.

podem ser influenciados positivamente pela maior disponibilidade de nutrientes no solo (Donato et al., 2016).

A utilização do esterco caprino para formulação de biofertilizante apresenta-se na literatura como uma alternativa para incrementar a produtividade de meloeiro, capim, feijão e outras espécies agrícolas e florestais (Araújo, 2011; Santos et al., 2014; Silva et al., 2015b). Porém, não se encontra estudos que avaliam a influência de biofertilizante caprino no crescimento e produtividade de palma forrageira.

A agricultura sustentável de baixo insumo surge como uma alternativa potencial para a implantação desta prática em regiões semiáridas, visto que os dejetos caprinos se encontram facilmente para a produção de biofertilizantes, onde podem ser utilizados para aumentar a disponibilidade de forragem, mitigar os riscos climáticos e melhorar as características do solo. Tais aplicações resultam em um melhor rendimento dos rebanhos, possibilitando a redução total ou parcial de fertilizantes sintéticos e reduzindo os custos de produção (Sarkar et al., 2020).

Indicadores agrometeorológicos para intensificação da produção de forragem com utilização da palma

Práticas de gerenciamento eficientes podem reduzir substancialmente o uso de nitrogênio. A obtenção de altos rendimentos nas terras agrícolas existentes nos países de menor rendimento é de grande importância para que a demanda global por alimento seja atendida com impactos ambientais mínimos. O manejo adequado dos recursos naturais pode refletir em excelentes resultados na produção agrícola, porém, seu mau uso provoca degeneração do meio físico natural. Logo, estudos que avaliam a eficiência do uso da água (EUA), eficiência do uso de radiação (EUR) e eficiência do uso de nutrientes (EUN) vem se tornando cada vez mais importante para o manejo adequado dos cultivos, onde possibilitam compreender as melhores condições de manejo para potencializar o desenvolvimento e a produtividade das culturas.

Eficiência no uso da água

Em 2010, uso anual de água no mundo correspondia a 4,9 trilhões de metros cúbicos, no entanto, a tendência atual é que em 2030 aumentará para 6,9 trilhões de metros cúbicos, sendo 40%

superior à capacidade de fornecimento de água disponível (Bodner et al., 2015). Aproximadamente 90% da demanda hídrica terrestre é oriunda de produtos agrícolas, e a agricultura é o maior setor de influência nos recursos hídricos do mundo (Cao et al., 2020; Xinchun et al., 2018). O déficit hídrico e a degradação do ambiente hídrico são empecilhos para o desenvolvimento sustentável, principalmente em regiões áridas e semiáridas devido a interação entre as variáveis climáticas e a água disponível (Pinheiro et al., 2019; Santos et al., 2020).

Os cenários de mudança climática podem provocar uma redução na disponibilidade de água para a produção agrícola e se tornar uma ameaça à segurança alimentar de regiões semiáridas, com isso, torna-se necessário aumentar a eficiência no uso dos recursos hídricos para a manutenção da produtividade das culturas (Challinor et al., 2016; Zhao et al., 2017). Práticas como a irrigação por gotejamento (e.g., pode melhorar a eficiência do uso da água do cultivo), adição de matéria orgânica no solo (aumentam a capacidade de retenção de água do solo) e a seleção de culturas tolerantes a seca (apresentam alta eficiência do uso da água) podem aumentar os rendimentos agrícolas (Tilman et al., 2002).

A eficiência do uso da água (EUA) relaciona a produtividade com o consumo hídrico, sendo bastante utilizada na seleção de variedades mais tolerantes ao estresse hídrico, onde o seu conhecimento é de fundamental importância para o manejo da frequência e duração dos intervalos de reposição de água no solo (Fernandes et al., 2018; Pereira et al., 2012).

Vários estudos salientam que a palma forrageira se apresenta como uma alternativa em regiões semiáridas para garantir a estabilidade forrageira das propriedades (Araújo Júnior et al., 2021a; Araújo Júnior et al., 2021b; Jardim, et al., 2021a; Araújo Júnior et al., 2021c; Silva, et al., 2021a; Félix et al., 2020; Jardim et al., 2020b; Jardim et al., 2021b; Queiroz et al., 2016; Queiroz et al., 2020b; Sabino et al., 2021; Silva et al., 2021b; Silva et al., 2015a). Entretanto, devido a necessidade de compreender a variação na produtividade da água da cultura (PA_C) e a produtividade econômica da água (PEA) em diferentes clones de palma forrageira. Silva et al. (2014a) avaliaram os clones Orelha de Elefante Mexicana, Miúda e IPA Sertânia no semiárido brasileiro (Tabela 4).

Tabela 4. Produtividade da água da cultura (PA_C) em base seca e fresca, produtividade econômica da água (PEA) com base na água precipitada (Prec.) e na evapotranspiração real da cultura (ETr) para três clones de palma forrageira.

Ref.	Clone	PA_C (BF) kg MV ha ⁻¹ mm ⁻¹	PA_C (BS) kg MS ha ⁻¹ mm ⁻¹	Ganho bruto R\$ ha ⁻¹	PEA R\$ ha ⁻¹ mm ⁻¹
Prec.	OEM	104,8	10,0	65.484	42,1
	IPA	80,0	6,9	57.400	36,9
	MIU	75,6	7,4	42.356	27,3
ETr	OEM	112,1	10,8	65.484	46,2
	IPA	101,1	8,8	57.400	44,3
	MIU	78,0	7,7	42.356	28,0

OEM - Orelha de Elefante Mexicana, IPA - IPA Sertânia, MIU - Miúda, BF é base fresca e BS é base seca.
Fonte: Silva et al. (2014a).

Castro et al. (2020) avaliando o desempenho agrônomo e eficiência de uso da água em cultivares de palma forrageira irrigada, verificaram que as produções de matéria fresca e seca apresentaram melhores resultados com o uso de lâminas de irrigação de 40% a 50% da evapotranspiração de referência (ET_0), com melhores resultados para o clone Miúda.

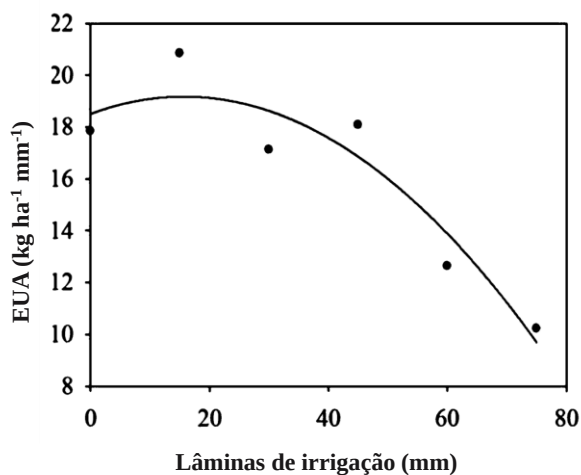


Figura 6. Eficiência do uso da água (EUA) do clone Miúda, em função das lâminas de água (% ET_0) aplicadas por gotejamento. Fonte: Adaptado de Castro et al. (2020).

No entanto, quando submetido a uma lâmina de irrigação menor (15,7% da ET_0), observou-se melhor EUA, além disso, o aumento da disponibilidade hídrica por irrigação, proporcionou uma redução na EUA (Figura 6). Porém, não existem estudos relacionando o uso de bioestimulantes e EUA de clones de palma forrageira.

Eficiência do uso da radiação solar

Do ponto de vista fisiológico, e considerando o potencial de crescimento, (Monteith e Moss, 1977) propuseram que a produção de biomassa acima do solo em condições sem estresse, é determinada pela quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) interceptada pelo dossel, e pela eficiência com que é usada para produzir matéria seca. Isso é conhecido como eficiência de uso de radiação (EUR), parâmetro biofísico muito utilizado nas ciências agrícolas.

A radiação solar vem se destacando nas pesquisas dos últimos anos, que buscam explorar o rendimento potencial das culturas, embora a temperatura e o fotoperíodo sejam os principais fatores que atuam sobre o desenvolvimento vegetal (Caron et al., 2014), visto que a radiação solar é responsável por provocar grande parte dos processos físicos, químicos e biológicos no sistema solo-planta-atmosfera (Kunz et al., 2007).

Existe uma relação linear entre a fitomassa e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelas plantas, sendo determinante para a produtividade, onde o uso efetivo de radiação pelas culturas depende da capacidade de interceptação do dossel. Por este motivo, a conversão da radiação absorvida em matéria seca varia de acordo com a espécie e qualidade da radiação (Caron et al., 2012). Segundo Teixeira et al. (2015), a diferença de absorção de radiação pelas plantas está atrelada a características morfológicas, como índice de área foliar, arranjo e inclinação das folhas, em relação à luz incidente. Pinheiro et al. (2014) afirmam que as espécies de palma exibem distinções da morfologia do dossel. Logo, podem apresentar variações na interceptação de radiação, e consequentemente na EUR, no entanto, avaliações de EUR para a cultura da palma forrageira são escassas na literatura.

Eficiência do uso dos nutrientes

Leite, R. M. C.; Jardim, A. M. R. F. J.; Araújo Júnior, G. N.; Alves, C. P.; Silva, G. I. N.; Rocha, A. K. P.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F.

A sustentabilidade da agricultura, especialmente no semiárido brasileiro, depende da manutenção de níveis nutricionais adequados e/ou da incorporação de matéria orgânica no solo (Donato et al., 2016). As cadeias de produção pecuária são uma das principais atividades socioeconômicas do semiárido brasileiro. Consequentemente, sua atividade exige uma alta entrada de suprimentos agrícolas (por exemplo, suplementação alimentar e manutenção da fertilidade do solo). Alcançar alta eficiência no uso de nutrientes é uma meta econômica e ambiental para sistemas agrícolas sustentáveis (Gastal et al., 2015; Heffer et al., 2015).

Diferentes fatores influenciam a eficiência geral do uso de nutrientes, como disponibilidade de água, sistema de preparo do solo, ganhos genéticos e disponibilidade de outros nutrientes (Carciochi et al., 2020; Duncan et al., 2018). A relação entre a absorção de nutrientes e a produção de biomassa pelas plantas é denominada eficiência do uso dos nutrientes. Moreira et al. (2020) salientam que a extração de nutrientes do solo varia em diferentes clones de palma forrageira, assim como a eficiência do uso dos nutrientes, que também é variável de acordo com a fonte de nutrientes utilizada e o tipo de solo do cultivo (Tabela 5).

Tabela 5. Eficiência do uso de nitrogênio (N), carbono (C), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) de três clones de palma forrageira (Miúda, Baiana e Orelha de Elefante Mexicana) sob diferentes fontes de nutrientes, em duas classes de solo (Luvisso e Planossolo) do semiárido brasileiro.

Tratamentos	N	C	P	K	Ca	Mg
	kg kg ⁻¹					
Clones	Luvisso					
OEM	0,12	0,06	0,19	0,49	0,10	0,05
MIU	0,15	0,07	0,78	0,27	0,02	0,18
Baiana	0,19	0,09	0,47	1,07	0,17	0,06
Fonte de nutriente	Planossolo					
Esterco	0,07	0,10	0,05	0,24	0,16	0,08
Esterco + N	0,05	0,12	0,05	0,13	0,13	0,22
Fertilizante mineral (NPK)	0,34	0,00	1,33	1,46	0,00	0,00
Clone	Planossolo					
OEM	0,05	0,04	0,40	0,56	0,03	0,04
MIU	0,09	0,02	0,27	0,72	0,02	0,03
Baiana	0,12	0,13	0,61	0,61	0,04	0,03
Fonte de nutriente	Planossolo					
Esterco	0,04	0,11	0,04	0,04	0,04	0,04
Esterco + N	0,03	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06
Fertilizante mineral (NPK)	0,19	0,00	1,79	1,79	0,00	0,00

Fonte: Moreira et al. (2020).

Silva et al. (2014a) avaliando indicadores de eficiência do uso da água e nutrientes da palma forrageira, verificou que os macronutrientes em diferentes clones, não se diferenciavam em eficiência, no entanto, o elemento magnésio com base na evapotranspiração, foi superior para os clones Orelha de Elefante Mexicana, aqueles que obtiveram maiores magnitudes na produtividade de massa fresca. Esse resultado pode estar associado à maior quantidade de clorênquima, que influencia diretamente na eficiência fotossintética e amplitude do índice de área do cladódio da Orelha de Elefante Mexicana (Silva et al., 2010).

Fenofase e momento de corte

A fenologia da vegetação é referida como o estudo do tempo dos eventos biológicos recorrentes durante o crescimento da vegetação. Desempenha um papel importante na determinação da função e estrutura do ecossistema, influenciando as distribuições espaciais e temporais da produtividade do ecossistema, armazenamento de carbono terrestre e o processo de transferência para emissão de CO₂ (Dragoni et al., 2011; Richardson et al., 2012). De acordo com Amorim et al. (2017), a fenologia da palma é um importante aspecto a ser avaliado, considerando a taxa de emissão de cladódios por ordem de surgimento (fenofase) ao longo do tempo.

A análise biométrica de plantas é uma ferramenta simples e baixo custo, capaz de

Leite, R. M. C.; Jardim, A. M. R. F. J.; Araújo Júnior, G. N.; Alves, C. P.; Silva, G. I. N.; Rocha, A. K. P.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F.

compreender e comparar as culturas em diferentes sistemas de cultivo. O uso de modelos com taxas e curvas de crescimento de plantas é extremamente importante, possibilitando melhor entendimento de informações relevantes do cultivo sob condições diversas (Conesa et al., 2017). Estudos de crescimento e desenvolvimento para clones de palma forrageira são escassos na literatura. No entanto, estes índices podem ser utilizados de forma simples para verificar o desempenho e a dinâmica da cultura em diferentes situações, possibilitando uma melhor tomada de decisão (Amorim et al., 2017; Araújo Júnior et al., 2021c; Nunes et al., 2019; Queiroz et al., 2015; Souza et al., 2021; Jardim et al., 2021c), visto que a qualidade e o desenvolvimento das plantas forrageiras podem ser alterados quimicamente e fenologicamente em decorrência das mudanças climáticas locais e do manejo adotado (Fangueiro et al., 2017).

Considerações finais

A palma forrageira apresenta uma alternativa para a produção sustentável de alimento para os rebanhos, onde o clone, o ambiente e as práticas de manejo (e.g., espaçamento das plantas, manejo da colheita, irrigação, fertilização e consórcio) afetam a dinâmica de crescimento, produtividade e os parâmetros agrometeorológicos da palma forrageira. O uso de biofertilizantes pode melhorar as características do solo e com uma maior disponibilidade de água para a cultura, a eficiência do uso da água tende a diminuir.

Mais estudos são necessários para melhor entender a dinâmica de crescimento e produtividade da palma forrageira em diferentes sistemas do cultivo no semiárido brasileiro, assim como seus indicadores agrometeorológicos, de forma que essas informações sejam utilizadas para melhorar o planejamento e a tomada de decisão dos produtores, proporcionando uma governança agropecuária mais eficiente nas unidades produtivas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001), Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE - APQ-0215-5.01/10 e FACEPE - APQ-1159-1.07/14), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286/2015-3,

309421/2018-7, e 152251/2018-9) pelo apoio financeiro e concessão das bolsas dos autores.

Referências

- Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., de Carvalho, A. L., de Siqueira Pinto, A., Santiago, G. A. C. F., Ometto, J. P. H. B., von Randow, C., & de Sá Barretto Sampaio, E. V., 2016. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, 360, 367–375.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.00>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/050>
- Alves, H. K. M. N., Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, & Silva, T. G. F. da S., 2018. The application of agrometeorological techniques contributes to the agricultural resilience of forage cactus: A review. *Amazonian Journal of Plant Research*, 2(3), 207–220.
<https://doi.org/10.26545/ajpr.2018.b00026x>
- Amorim, D. M., Silva, T. G. F. da, Pereira, P. de C., Souza, L. S. B. de, & Minuzzi, R. B., 2017. Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 47(1), 62–71.
<https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4742746>
- Angelotti, F., Paulo Ivan, F. J., & de Sá, I. B., 2011. Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro: Medidas de Mitigação e Adaptação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 06, 1097–1111.
<https://doi.org/10.5935/1984-2295.20140015>
- Aquino, R., Lemos, C., Alencar, C., Silva, E., Lima, R., Gomes, J., & Silva, A., 2016. A realidade da caprinocultura e ovinocultura no semiárido brasileiro: um retrato do sertão do Araripe, Pernambuco. *PubVet*, 10(4), 271–281.
<https://doi.org/10.22256/pubvet.v10n4.271-281>
- Araújo Júnior, G. D. N., da Silva, T. G. F., de Souza, L. S. B., Souza, M. de S., de Araújo, G. G. L., de Moura, M. S. B., Santos, J. P. A. de S., Jardim, A. M. da R. F., Alves, C. P., &

- Alves, H. K. M. N., 2021a. Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. *Bragantia*, 80, 1–12. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200390>
- Araújo Júnior, G. do N., Jardim, A. M. da R. F., Silva, M. J. da, Alves, C. P., Souza, C. A. A. de, Costa, S. A. T. da, Cunha, M. V. da, Simões, A. do N., Silva, J. R. I. da, Souza, L. S. B. de, & Silva, T. G. F., 2021b. Growth dynamics and accumulation of forage mass of forage cactus clones as affected by meteorological variables and water regime. *European Journal of Agronomy*, 131(September). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126375>
- Araújo Júnior, G. do N., Silva, T. G. F. da, Souza, L. S. B. de, Araújo, G. G. L. de, Moura, M. S. B. de, Alves, C. P., Salvador, K. R. da S., Souza, C. A. A. de, Montenegro, A. A. de A., & Silva, M. J., 2021c. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. *Journal of Arid Environments*, 190(May 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104510>
- Araújo, S. M. S., 2011. A REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE DO BRASIL: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. *Rios Eletrônica*, 81–98
- Awazi, N. P., Tchamba, M. N., & Avana, T. M. L., 2019. Climate change resiliency choices of small-scale farmers in Cameroon: determinants and policy implications. *Journal of Environmental Management*, 250(September), 109560. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109560>
- Barbosa, H. A., & Lakshmi Kumar, T. V., 2016. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments*, 124, 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.015>
- Beuchle, R., Grecchi, R. C., Shimabukuro, Y. E., Seliger, R., Eva, H. D., Sano, E., & Achard, F., 2015. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, 58, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.011>
- Bodner, G., Nakhforoosh, A., & Kaul, H. P., 2015. Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 401–442. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4>
- Cao, X., Zeng, W., Wu, M., Guo, X., & Wang, W., 2020. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation. *Agricultural Water Management*, 231(January), 106027. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106027>
- Carciochi, W. D., Salvaggiotti, F., Pagani, A., Reussi Calvo, N. I., Eyherabide, M., Sainz Rozas, H. R., & Ciampitti, I. A., 2020. Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize. *European Journal of Agronomy*, 116(March), 126045. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126045>
- Cardador-Martínez, A., Jiménez-Martínez, C., & Sandoval, G., 2011. Revalorization of cactus pear (*Opuntia* spp.) wastes as a source of antioxidants. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 31(3), 782–788. <https://doi.org/10.1590/s010120612011000300036>
- Cardoso, D. B., Carvalho, F. F. R. de, Medeiros, G. R. de, Guim, A., Cabral, A. M. D., Vêras, R. M. L., Santos, K. C. dos, Dantas, L. C. N., & Nascimento, A. G. de O., 2019. Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 247(May 2018), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.016>
- Caron, B. O., de Souza, V. Q., Trevisan, R., Behling, A., Schmidt, D., Bamberg, R., & Eloy, E., 2012. Eficiência de Conversão da Radiação Fotossinteticamente Ativa Interceptada em Fitomassa de Muda de Eucalipto. *Revista Arvore*, 36(5), 833–842. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000500005>
- Caron, B. O., Schmidt, D., Manfron, P. A., Behling, A., Eloy, E., & Busanello, C., 2014. EFFICIENCY OF THE USE OF SOLAR RADIATION FOR PLANTS *Ilex paraguariensis*. *Ciência Florestal*, 24(2), 257–265

- Castro, I. N., Santos, S. R. Dos, Kondo, M. K., Maia, V. M., & Santos, C. C. R. Dos., 2020. Agronomic performance and water use efficiency of irrigated cactus pear cultivars. *Revista Caatinga*, 33(2), 529–540. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n225rc>
- Challinor, A. J., Koehler, A. K., Ramirez-Villegas, J., Whitfield, S., & Das, B., 2011). Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems adapt immediately. *Nature Climate Change*, 6(10), 954–958. <https://doi.org/10.1038/nclimate3061>
- Conesa, M., Muir, C. D., Roldán, E. J., Molins, A., Perdomo, J. A., & Galmés, J., 2017. Growth capacity in wild tomatoes and relatives correlates with original climate in arid and semi-arid species. *Environmental and Experimental Botany*, 141(April), 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.009>
- Conway, S. F., McDonagh, J., Farrell, M., & Kinsella, A., 2017. Uncovering obstacles: The exercise of symbolic power in the complex arena of intergenerational family farm transfer. *Journal of Rural Studies*, 54, 60–75. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.06.00>
- Costa, M. da S., Oliveira-Júnior, J. F. de, Santos, P. J. dos, Correia Filho, W. L. F., Gois, G. de, Blanco, C. J. C., Teodoro, P. E., Silva Junior, C. A. da, Santiago, D. de B., Souza, E. de O., & Jardim, A. M. da R. F., 2020a. Rainfall extremes and drought in Northeast Brazil and its relationship with El Niño–Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2111–E2135. <https://doi.org/10.1002/joc.6835>
- Costa, R. L., Baptista, G. M. de M., Gomes, H. B., Silva, F. D. dos S., Rocha Júnior, R. L. da, Salvador, M. de A., & Herdies, D. L., 2020b. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>
- Cramer, V. A., Hobbs, R. J., & Standish, R. J., 2008. What’s new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Trends in Ecology and Evolution*, 23(2), 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.005>
- Cruz Neto, J. F. Da, Morais, J. E. F. de, Souza, C. A. A. de, Carvalho, H. F. D. S., Rodrigues, C. T. A., & Silva, T. G. F., 2017. Aplicabilidade de indicadores agrometeorológicos para análise do incremento de água por irrigação em sistemas de produção da palma forrageira, cv. Miúda. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2(2), 98–106. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.2.2017.1170.98-106>
- Dantas, S. F. de A., Lima, G. F. da C., & Mota, E. P. 2017. Viabilidade econômica da produção de palma forrageira irrigada e adensada no semiárido Potiguar. *Revista Ipecege*, 3(1), 59–74. <https://doi.org/10.22167/r.ipecege.2017.1.59>
- Donato, P. E. R., Donato, S. L. R., Silva, J. A., Pires, A. J. V., Rosa, R. C. C., & Aquino, A. A., 2016. Nutrition and yield of ‘Gigante’ cactus pear cultivated with different spacings and organic fertilizer. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(12), 1083–1088. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n12p1083-1088>
- Dragoni, D., Schmid, H. P., Wayson, C. A., Potter, H., Grimmond, C. S. B., & Randolph, J. C., 2011. Evidence of increased net ecosystem productivity associated with a longer vegetated season in a deciduous forest in south-central Indiana, USA. *Global Change Biology*, 17(2), 886–897. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02281.x>
- Dubeux Jr., J. C. B., Santos, M. V. F. , Cunha, M. V. C., Ferreira, M. A., Santos, D. C., Lira, M. D. A., & Silva, M. C., 2015. Forage potential of cacti on drylands. *Acta Horticulturae*, 181–186
- Dubeux Júnior, J. C. B., Araújo Filho, J. T., Santos, M. V. F., Lira, M. A., Santos, D. C., & Pessoa, R. A. S., 2010. Adubação mineral no crescimento e composição mineral da palma forrageira –Clone IPA-201. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 5(1), 129–135. <https://doi.org/10.5039/agraria.v5i1a591>
- Duncan, E. G., O’Sullivan, C. A., Roper, M. M., Biggs, J. S., & Peoples, M. B., 2018. Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat: Review. *Field Crops Research*, 226(July), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.010>

- Eistrup, M., Sanches, A. R., Muñoz-Rojas, J., & Correia, T. P., 2019. A “young farmer problem”? Opportunities and constraints for generational renewal in farm management: An example from southern Europe. *Land*, 8(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/land8040070>
- Falcão, H. M., Oliveira, M. T., Mergulhão, A. C., Silva, M. V., & Santos, M. G., 2013. Ecophysiological performance of three *Opuntia ficus-indica* cultivars exposed to carmine cochineal under field conditions. *Scientia Horticulturae*, 150, 419–424. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.11.021>
- Fangueiro, D., Pereira, J. L. S., Macedo, S., Trindade, H., Vasconcelos, E., & Coutinho, J., 2017. Surface application of acidified cattle slurry compared to slurry injection: Impact on NH₃, N₂O, CO₂ and CH₄ emissions and crop uptake. *Geoderma*, 306(June), 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.023>
- FAO., 2018. Food Security and Nutrition in the World the State of Building Climate Resilience for Food Security and Nutrition. www.fao.org/publications
- FAO., 2020. Food Security and Nutrition in the World. In *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*
- Félix, A. da S., Nascimento, J. W. B. do, Melo, D. F., Furtado, D. A., & Santos, A. M., 2020. Exploratory analysis of impacts of climatic changes on vegetal production in Brazil. *Revista Em Agronegocio e Meio Ambiente*, 13(1), 397–409. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n1p397-407>
- Fernandes, F. H. S., Sano, E. E., Ferreira, L. G., de Mello Baptista, G. M., Victoria, D. de C., & Fassoni-Andrade, A. C., 2018. Degradation trends based on MODIS-derived estimates of productivity and water use efficiency: A case study for the cultivated pastures in the Brazilian Cerrado. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11(April), 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.04.014>
- Ferreira, M. D. A., Silva, F. M. Da, Bispo, S. V., & Azevedo, M., 2009. Estratégias na suplementação de vacas leiteiras no semi-árido do Brasil. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38(SUPPL. 1), 322–329. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300032>
- Galbiatti, J. A., Silva, F. G., Franco, C. F., & Caramelo, A. D., 2011. DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO SOB O USO DE BIOFERTILIZANTE E ADUBAÇÃO MINERAL. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 31(1), 167–177
- Gama, D. C., & Jesus, J. B., 2020. PRINCIPAIS SOLOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL FAVORÁVEIS AO CULTIVO DO *Eucalyptus L’ Heritier*. *BIOFIX Scientific Journal*, 5(2), 214. <https://doi.org/10.5380/biofix.v5i2.70968>
- Garcete-Gómez, J. M., Conforto, C., Domínguez-Monge, S., Flores-Sánchez, J. L., Mora-Aguilera, G., & Michereff, S. J., 2017. Sample size for assessment of cladode brown spot in prickly pear cactus. *European Journal of Plant Pathology*, 149(3), 759–763. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1213-x>
- García, G. A. G., Gutiérrez-Montes, I., Hernández Núñez, H. E., Suárez Salazar, J. C., & Casanoves, F., 2020. Relevance of local knowledge in decision-making and rural innovation: A methodological proposal for leveraging participation of Colombian cocoa producers. *Journal of Rural Studies*, 75(January), 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.01.012>
- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J. L., & Louarn, G., 2015. Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. In *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy: Second Edition (Second Edition)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00008-X>
- Gutiérrez, M., Biagioni, R. N., Alarcón-Herrera, M. T., & Rivas-Lucero, B. A., 2018. An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems. *Science of the Total Environment*, 624, 1513–1522. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.252>
- Harrison, S., McAree, C., Mulville, W., & Sullivan, T., 2019. The problem of agricultural ‘diffuse’ pollution: Getting to the point. *Science of the Total Environment*, 677, 700–717. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.169>

- Heffer, P., Magen, H., Mikkelsen, R., & Wichelns, D., 2015. Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification. In International Fertilizer Industry Association.
- Heffer, P., & Prud, M., 2015. Fertilizer Outlook 2011 - 2015. May 2011, 0–7
- Hinojosa, L., Napoléone, C., Moulery, M., & Lambin, E. F., 2016. The “mountain effect” in the abandonment of grasslands: Insights from the French Southern Alps. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 221, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.032>
- IBGE., 2019. Censo agropecuário 2017: resultados definitivos. Censo Agropecuário, 8, 1–105. https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_resultados_definitivos.pdf
- Inwood, S., Clark, J. K., & Bean, M., 2013. The differing values of multigeneration and first-generation farmers: Their influence on the structure of agriculture at the rural-urban interface. *Rural Sociology*, 78(3), 346–370. <https://doi.org/10.1111/ruso.12012>
- Jardim, A. M. da R. F., Santos, H. R. B., Alves, H. K. M. N., Ferreira-Silva, S. L., Souza, L. S. B. de, Araújo Júnior, G. do N., Souza, M. de S., Araújo, G. G. L. de, Souza, C. A. A. de, & Silva, T. G. F., 2021a. Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162(November 2020), 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.01>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, M. V., Silva, A. R., dos Santos, A., Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F., de Lima, J. L. M. P., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Lopes, P. M. O., Moura, G. B. A., & Silva, T. G. F., 2021a. Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105733. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105733>
- Jardim, A. M. da R. F., Silva, T. G. F. da, Souza, L. S. B. de, Araújo Júnior, G. do N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. de S., Araújo, G. G. L. de, & Moura, M. S. B., 2021b. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *Journal of Arid Environments*, 188(February 2020), 104464. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>
- Jardim, A. M. R. F., Souza, L. S. B., Alves, C. P., Araújo, J. F. N., Souza, C.A.A., Pinheiro, A. G., Araújo, G. G. L., Campos, F. S., Tabosa, J. N., Silva, T. G. F., 2021c. Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. *African Journal of Range and Forage Science*, 38:1–12. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1949749>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, J. R. I., Silva, M. V., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Alves, H. K. M. N., Mesquita, M., Souza, P. J. O. P., Teixeira, A. H. C., Silva, T. G. F. 2021d. Modelling the Darcy–Weisbach friction factor and the energy gradient of the lateral line. *Irrigation and Drainage* 70, 1–13. <https://doi.org/10.1002/ird.2658>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Souza, M. S., Morais, J. E. F., Araújo Júnior, G. N. 2020a. Multivariate analysis in the morphoyield evaluation of forage cactus intercropped with sorghum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24, 756–761. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n11p756-761>
- Jardim, A. M. da R. F., Silva, T. G. F. da, Souza, L. S. B. de, & Souza, M. de S., 2020b. Interaction of agroecosystem intercropped with forage cactus-sorghum in the semi-arid environment: a review. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(1), 069–087. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.1.2020.2743.069-087>
- Ji, S., Liu, Z., Liu, B., Wang, Y., & Wang, J., 2020. The effect of Trichoderma biofertilizer on the quality of flowering Chinese cabbage and the soil environment. *Scientia Horticulturae*, 262(December 2019), 109069. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109069>
- Jiménez, D., Delerce, S., Dorado, H., Cock, J., Muñoz, L. A., Agamez, A., & Jarvis, A., 2019. A scalable scheme to implement data-driven agriculture for small-scale farmers. *Global Food Security*, 23(August), 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.08.004>
- Kunz, J. H., Bergonci, J. I., Bergamaschi, H., Dalmago, G. A., Heckler, B. M. M., &

- Comiran, F., 2007. Interception and use of solar radiation by maize, as modifying soil tillage, row spacing and irrigation water availability. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 42(11), 1511–1520. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2007001100001>
- Ledru, M.-P., Jeske-Pieruschka, V., Bremond, L., Develle, A.-L., Sabatier, P., Martins, E. S. P. R., de Freitas Filho, M. R., Fontenele, D. P., Arnaud, F., Favier, C., Barroso, F. R. G., & Araújo, F. S., 2020. When archives are missing, deciphering the effects of public policies and climate variability on the Brazilian semi-arid region using sediment core studies. *The Science of the Total Environment*, 723, 137989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137989>
- Levers, C., Schneider, M., Prishchepov, A. V., Estel, S., & Kuemmerle, T., 2018. Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe. *Science of the Total Environment*, 644, 95–111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.326>
- Lima, L. R., da Silva, T. G. F., Jardim, A. M. d. R. F., de Souza, C. A. A., de Queiroz, M. G., & Tabosa, J. N., 2018. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 113–118. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p113-118>
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C. C., Cunha, A. P., Brito, S., & Moraes, O. L. L., 2018. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 90(2), 1973–1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Marques, O. F. C., Gomes, L. S. de P., Mourthé, M. H. F., & Thiago Gomes dos Santos Braz, O. de S. P. N., 2017. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. *Caderno de Ciência Agrária*, 9(1), 75–93. <file:///C:/Users/Dell/Downloads/3594-12109-1-PB.pdf>
- Marques, T. V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A. M., Campos, S., Lúcio, P. S., Lima, K., dos Reis, J., Ramos, T. M., da Silva, D. F., Oliveira, C. P., Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Santos e Silva, C. M., & Bezerra, B., 2020. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287(February 2019), 107957. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>
- Medeiros, A. de S., Maia, S. M. F., Santos, T. C. dos, & Gomes, T. C. de A., 2020. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 287(September 2019), 106690. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690>
- Miao, C., Sun, Q., Duan, Q., & Wang, Y., 2016. Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the Loess Plateau during the period 1961–2011. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3221–3234. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3022-x>
- Ministério da Integração Nacional. (2017). Nova delimitação Semiárido. SUDENE, 2017, 63.
- Mohamed, E. S., Saleh, A. M., & Belal, A. A., 2014. Sustainability indicators for agricultural land use based on GIS spatial modeling in North of Sinai-Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 17(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.05.001>
- Monteith, J. L., & Moss, C. J., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 281(980), 277–294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Moraes, G. S. de O., Guim, A., Tabosa, J. N., Chagas, J. C. C., Almeida, M. de P., & Ferreira, M. de A., 2019. Cactus [Opuntia stricta (Haw.) Haw] cladodes and corn silage: How do we maximize the performance of lactating dairy cows reared in semiarid regions? *Livestock Science*, 221(June 2018), 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.026>
- Moreira, J. M., Pérez-Marin, A. M., Araújo, J. S., Lambais, G. R., & Sales, A. T., 2020. Nutrients demand of cactus forage. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2), 8100–8820.
- Nunes, J. D. S. L., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B. de, Jardim, A. M. da R. F., Alves, H. K. M. N., Cruz Neto, J. F. da, Leite, R. M. C., &

- Pinheiro, A. G., 2019. Morfogênese da palma forrageira sob modificação do ambiente de crescimento. *Agrometeoros*, 27(2), 367–375. <https://doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26449>
- Oliveira-Júnior, J. F., de Gois, G., de Lima Silva, I. J., de Oliveira Souza, E., Jardim, A. M. R. F., Silva, M. V., Jamjareegulgarn, P. 2021. Wet and dry periods in the state of Alagoas (Northeast Brazil) via Standardized Precipitation Index. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 224, 105746. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105746>
- Oliveira, D. P., Sartor, L. R., Souza Júnior, V. S., Corrêa, M. M., Romero, R. E., Andrade, G. R. P., & Ferreira, T. O., 2018. Weathering and clay formation in semi-arid calcareous soils from Northeastern Brazil. *Catena*, 162(October 2017), 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.030>
- ONU., 2019. World population prospects 2019. In Department of Economic and Social Affairs. *World Population Prospects 2019*. (Issue 141). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12283219>
- Paredes-Trejo, F. J., Barbosa, H. A., & Lakshmi Kumar, T. V., 2017. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*, 139, 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>
- Pereira, L. H., & Nascimento, P. S. S., 2020. Avaliação das normais climatológicas em municípios do Nordeste brasileiro no período de 1961 a 2010. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 13–27. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-002>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I., 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Pereira, P. D. C., SILVA, T. G. F. DA, ZOLNIER, S., MORAIS, J. E. F. DE, & SANTOS, D. C., 2015. Morfogênese Da Palma Forrageira Irrigada Por Gotejamento. *Revista Caatinga*, 28(3), 184–195. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n321rc>
- Pinheiro, A. G., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., & Silva, T. G. F., 2021. Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira - Revisão. *Revista Brasileira de Geografia*, 57(06), 643–652.
- Pinheiro, E. A. R., de Jong van Lier, Q., & Šimůnek, J., 2019. The role of soil hydraulic properties in crop water use efficiency: A process-based analysis for some Brazilian scenarios. *Agricultural Systems*, 173(February), 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.019>
- Pinheiro, K. M., da Silva, T. G. F., de Sousa Carvalho, H. F., Santos, J. E. O., de Moraes, J. E. F., Zolnier, S., & dos Santos, D. C., 2014. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(12), 939–947. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>
- Queiroz, M. G. de, Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., de Souza, C. A. A., de Souza, L. S. B., do Nascimento Araújo, G., Jardim, A. M. da R. F., & de Moura, M. S. B., 2020a. Partitioning of rainfall in a seasonal dry tropical forest. *Ecology and Hydrobiology*, 20(2), 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.02.001>
- Queiroz, M. G. de, Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., Jardim, A. M. da R. F., Souza, C. A. A. de, Araújo Júnior, G. D. N., Moraes, J. E. F. de, & Souza, L. S. B. 2020b. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *Catena*, 188(January), 104457. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104457>
- Queiroz, M. G. de, Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., Silva, S. M. S. e, Souza, C. A. A. de, & Carvalho, H. F. de S., 2016. Relações Hídrico-Econômicas Da Palma Forrageira Cultivada Em Ambiente Semiárido. *Irriga*, 1(01), 141–154. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- Queiroz, M. G. de, Silva, T. G. F., Zolnier, S., Silva, S. M. S. e, Lima, L. R., & Alves, F. de O., 2015. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 931–938. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>

- Richardson, A. D., Anderson, R. S., Arain, M. A., Barr, A. G., Bohrer, G., Chen, G., Chen, J. M., Ciais, P., Davis, K. J., Desai, A. R., Dietze, M. C., Dragoni, D., Garrity, S. R., Gough, C. M., Grant, R., Hollinger, D. Y., Margolis, H. A., Mccaughey, H., Migliavacca, M., ... Xue, Y., 2012. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: Results from the North American Carbon Program Site Synthesis. *Global Change Biology*, 18(2), 566–584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02562.x>
- Sá, J. C. D. M., Tivet, F., Lal, R., Briedis, C., Hartman, D. C., dos Santos, J. Z., & dos Santos, J. B., 2014. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 136(2014), 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.010>
- Sabino, F. da C., de Souza, L. S. B., de Souza, M. A. G., de Barros, J. P. A., de Lucena, L. R. R., Jardim, A. M. da R. F., Rocha, A. K. P., & da Silva, T. G. F., 2021. Morphological characteristics, biomass accumulation and gas exchange of an important species native for restoration in Semi-arid Brazilian areas affected by salt and water stress. *Plant Stress*, 2, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100021>
- Santos, A., Lopes, P. M. O., da Silva, M. V., Jardim, A. M. R. F., de Albuquerque Moura, G. B., Fernandes, G. S. T., ... & de Oliveira-Júnior, J. F., 2020. Causes and consequences of seasonal changes in the water flow of the São Francisco river in the semiarid of Brazil. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100084>
- Santos, A. P. G., Viana, T. V. A., Sousa, G. G., Gomes-do-Ó, L. M., Azevedo, B. M., & Santos, A. M., 2014. Produtividade e qualidade de frutos do meloeiro em função de tipos e doses de biofertilizantes. *Horticultura Brasileira*, 32(4), 409–416. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620140000400007>
- Sarkar, D., Kar, S. K., Chattopadhyay, A., Shikha, Rakshit, A., Tripathi, V. K., Dubey, P. K., & Abhilash, P. C., 2020. Low input sustainable agriculture: A viable climate-smart option for boosting food production in a warming world. *Ecological Indicators*, 115(April), 106412. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106412>
- Silva, M. V. da, Pandorfi, H., Almeida, G. L. P. de, Lima, R. P. de, Santos, A. dos, Jardim, A. M. da R. F., Rolim, M. M., Silva, J. L. B. da, Batista, P. H. D., Silva, R. A. B. da, Lopes, P. M. O., & Silva, D. C., 2021b. Spatio-temporal monitoring of soil and plant indicators under forage cactus cultivation by geoprocessing in Brazilian semi-arid region. *Journal of South American Earth Sciences*, 107(January). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103155>
- Silva, T. G. F. da, Araújo Primo, J. T., Moraes, J. E. F. de, Diniz, W. J. da S., Souza, C. A. A. de, & Silva, M. da C., 2015a. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. *Revista Caatinga*, 28(2), 10–18. https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/3630/pdf_241
- Silva, T. G. F. da, Leal de Araújo, G. G., Beserra de Moura, M. S., & Bastos de Souza, L. S., 2017. Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. *Amazonian Journal of Plant Research*, 1(2), 45–68. <https://doi.org/10.26545/b00006x>
- Silva, G. I. N., Hermínio, P. J., Pinheiro, A. G., Jardim, A. M. da R. F., Leite, R. M. C., Silva, T. G. F., & Souza, L. S. B., 2021a. Entendendo as Características Associadas à Precipitação para uma Região do Nordeste do Pará: Uma Análise do Comportamento, Tendência, Eventos Extremos e Tempo de Retorno para o período de 1973-2010. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(6), 3177–3192.
- Silva, G. I. N., Jardim, A. M. da R. F., Alves, H. K. M. N., Souza, M. de S., Souza, C. A. A. de, Araújo Júnior, G. do N., Alves, C. P., Pinheiro, A. G., Salvador, K. R. da S., Leite, R. M. C., Costa, S. A. T., Silva, M. J., & Silva, T. G. F., 2020. Cultivo de plantas forrageiras de apelo regional para o Semiárido brasileiro sob a perspectiva de técnicas agrometeorológicas para melhoria da resiliência: uma revisão. *Research, Society and Development*, 9(10), e1449108291. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8291>
- Silva, J., Nascimento, J. L., Santos, M. B., Gama, A., Queiroz, M. A., & Yano-Melo, A., 2015b. Biofertilizante caprino no desenvolvimento

- de *Urochloa ruziziensis*. *Archivos de Zootecnia*, 64(248), 323–329. <https://doi.org/10.21071/az.v64i248.416>
- Silva, L. M. D., Fagundes, J. L., Viegas, P. A. A., Muniz, E. N., Rangel, J. H. D. A., Moreira, A. L., & Backes, A. A., 2014b. Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. *Ciência Rural*, 44, 2064-2071.
- Silva, M. G. S., Dubeux, J. C. B., Assis, L. C. da S. L. C., Mota, D. L., da Silva, L. L. S., dos Santos, M. V. F., & dos Santos, D. C., 2010. Anatomy of different forage cacti with contrasting insect resistance. *Journal of Arid Environments*, 74(6), 718–722. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.11.003>
- Silva, T. A., Ferreira, J., Calijuri, M. L., Santos, V. J. dos S., Alves, S. do C., & Castro, J. de S., 2021b. Efficiency of technologies to live with drought in agricultural development in Brazil's semi-arid regions. *Journal of Arid Environments*, 192(March). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104538>
- Silva, T. G. F., Primo, J. T. A., e Silva, S. M. S., de Moura, M. S. B., dos Santos, D. C., Silva, M. da C., & Araújo, J. E. M., 2014a. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no semiárido Brasileiro. *Bragantia*, 73(2), 184–191. <https://doi.org/10.1590/brag.2014.017>
- Simões, A. F., Kligerman, D. C., Rovere, E. L. La, Maroun, M. R., Barata, M., & Obermaier, M., 2010. Enhancing adaptive capacity to climate change: The case of smallholder farmers in the Brazilian semi-arid region. *Environmental Science and Policy*, 13(8), 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.08.005>
- Sousa, G. B., Cavalcante, L. F., Cavalcante, I. H. L., Beckmann-Cavalcante, M. Z., & Nascimento, J. A., 2008. Salinidade Do Substrato Contendo Biofertilizante Para Formação De Mudanças De Maracujazeiro Irrigado Com Água Salina. *Revista Caatinga*, 21(2), 172–180.
- Souza, M. D. S., Freire da Silva, T. G., de Souza, L. S. B., Alves, H. K. M. N., Leite, R. M. C., de Souza, C. A. A., Araújo, G. G. L. D., Campos, F. S., Silva, M. J. D., & de Souza, P. J. D. O. P., 2021. Growth, phenology and harvesting time of cactus-millet intercropping system under biotic mulching. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 00(00), 1–15. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1852553>
- SUDENE., 2021. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. <https://www.gov.br/sudene/pt-br>
- Teixeira, G. C. da S., Stone, L. F., & Heinemann, A. B., 2015. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 45(1), 9–17. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4528297>
- Thornthwaite, C. W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Triviño-Tarradas, P., Carranza-Cañadas, P., Mesas-Carrascosa, F. J., & Gonzalez-Sanchez, E. J., 2020. Evaluation of agricultural sustainability on a mixed vineyard and olive-grove farm in Southern Spain through the INSPIA model. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/su12031090>
- Vasconcelos, A. G. V., de Andrade Lira, M., Bezerra Cavalcanti, V. L., dos Santos, M. V. F., & Willadino, L., 2009. Seleção de clones de palma forrageira resistentes à cochonilha-do-carmim (*Dactylopius* sp). *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38(5), 827–831. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000500007>
- Velten, S., Leventon, J., Jager, N., & Newig, J., 2015. What is sustainable agriculture? A systematic review. *Sustainability (Switzerland)*, 7(6), 7833–7865. <https://doi.org/10.3390/su7067833>
- Vieira, R. M. da S. P., Sestini, M. F., Tomasella, J., Marchezini, V., Pereira, G. R., Barbosa, A. A., Santos, F. C., Rodriguez, D. A., do Nascimento, F. R., Santana, M. O., Barreto Campello, F. C., & Ometto, J. P. H. B., 2020. Characterizing spatio-temporal patterns of social vulnerability to droughts, degradation and desertification in the Brazilian northeast. *Environmental and Sustainability Indicators*, 5(May 2019).

- <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100016>
 Vitor, C. M. T., Fonseca, D. M. da, Cóser, A. C., Martins, C. E., Nascimento Júnior, D. do, & Ribeiro Júnior, J. I., 2009. Produção de matéria seca e valor nutritivo de pastagem de capim-elefante sob irrigação e adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38(3), 435–442.
<https://doi.org/10.1590/s1516-35982009000300006>
- Watts, D. B., Runion, G. B., & Balkcom, K. S., 2017. Nitrogen fertilizer sources and tillage effects on cotton growth, yield, and fiber quality in a coastal plain soil. *Field Crops Research*, 201, 184–191.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.11.008>
- Withers, P. J. A., Neal, C., Jarvie, H. P., & Doody, D. G., 2014. Agriculture and eutrophication: Where do we go from here? *Sustainability (Switzerland)*, 6(9), 5853–5875.
<https://doi.org/10.3390/su6095853>
- Wójcik, M., Jeziorska-Biel, P., & Czapiewski, K., 2019. Between words: A generational discussion about farming knowledge sources. *Journal of Rural Studies*, 67(May 2018), 130–141.
<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.02.024>
- Wuepper, D., Wimmer, S., & Sauer, J., 2020. Is small family farming more environmentally sustainable? Evidence from a spatial regression discontinuity design in Germany. *Land Use Policy*, 90(January 2019), 104360.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104360>
- Xavier Junior, O. S., Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, Souza, C. A. A. de S., Neto, J. F. da C., Araújo Júnior, G. D. N., Leite, R. M. C., & Silva, T. G. F., 2021. Utilização de biofertilizantes alternativos no cultivo de palma forrageira: Uma revisão Use of alternative biofertilizers in the cultivation of forage cactus: A review Uso de biofertilizantes alternativos en el cultivo de palma forrajera: Una revisión. *Research, Society and Development*, 10(6), e46110616024. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.16024>
- Xinchun, C., Mengyang, W., Rui, S., La, Z., Dan, C., Guangcheng, S., Xiangping, G., Weiguang, W., & Shuhai, T., 2018. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China. *Science of the Total Environment*, 610–611, 84–93.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.011>
- Yadav, R. S., Singh, V., Pal, S., Meena, S. K., Meena, V. S., Sarma, B. K., Singh, H. B., & Rakshit, A., 2018. Seed bio-priming of baby corn emerged as a viable strategy for reducing mineral fertilizer use and increasing productivity. *Scientia Horticulturae*, 241(October 2017), 93–99.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.096>
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J. L., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I. A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., ... Asseng, S., 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35), 9326–9331.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>