

Modelos matemáticos para estimativa de área e peso de cladódio de palma Doce Miúda

Mathematical models for estimation cladode area and weight in forage cactus Little

Sweet clone

Modelos matemáticos para estimación del área y el peso del cladodio de la palma Doce

Miúda

Recebido: 25/12/2020 | Revisado: 26/12/2020 | Aceito: 28/12/2020 | Publicado: 30/12/2020

Maurício Luiz de Mello Vieira Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4241-241X>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: nopalea21@yahoo.com.br

Gabrieli Alves de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-7457>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: gabrielimandu@hotmail.com

Leandro Ricardo Rodrigues de Lucena

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6985-7668>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: leandroricardo_est@yahoo.com.br

Antônio Dennys Melo de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6370-8124>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: dennysmelo15@gmail.com

Álefe Chagas de Lima Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7021-4037>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: alefechagas@outlook.com

Fredson Luan Queiroz dos Anjos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5168-2289>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: fredsonluanluan@gmail.com

Carla Barbosa da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0508-4026>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: karlabarbosa@live.com

Igor Masterson de Farias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-3201>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: igormastersonfarias@gmail.com

Resumo

A palma é uma das principais forrageiras utilizadas na alimentação de ruminantes em regiões semiáridas. Medidas de área e peso de cladódio são necessárias em estudos agrônômicos, sendo um dos principais parâmetros usados para avaliar o crescimento das cactáceas. Assim, objetivou-se definir os melhores modelos para estimativa de área e peso de cladódio da palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* clone Doce Miúda) de forma não destrutiva com base nas dimensões lineares do cladódio. Para determinar a área e peso de cladódio, foram coletados, aleatoriamente, 582 cladódios, sendo 191 primários, 186 secundários e 205 terciários. Em seguida, os cladódios foram numerados e pesados individualmente. As dimensões lineares de comprimento (C), largura máxima (L) e espessura (E) de cada cladódio foram medidas com um paquímetro digital. A área do cladódio foi calculada pelo método gravimétrico. Foram utilizados os modelos de regressão linear, gamma e potência para explicar a área e peso de cladódio. Os critérios de avaliação dos modelos foram coeficiente de determinação, critério de informação de Akaike, soma de quadrado de resíduo e índice de Willmott. Os modelos potência foram os mais eficientes para explicar a área do cladódio (AC) em função do produto do comprimento pela largura, e peso do cladódio (PC) em função do produto do comprimento pela largura e espessura. Os modelos potência, $\widehat{AC} = CL^{0,985}$ e $\widehat{PC} = 0,0045(E^{0,806} CL^{1,099})$, podem ser usados com maior precisão para estimar, respectivamente, a área e peso do cladódio do clone Doce Miúda com base nos valores das dimensões lineares do cladódio.

Palavras-chave: Método não destrutivo; Modelagem; *Nopalea cochenillifera*.

Abstract

The forage cactus is one of the main forages used to feed ruminants in semiarid regions. Cladode area and weight measurements are necessary in agronomic studies, being one of the

main parameters used to evaluate the cacti growth. Thus, the objective was to define the best models for estimating the cladode area and weight of Little Sweet clone (*Nopalea cochenillifera*) in a non-destructive way based on the cladod linear dimensions. To determine the cladode area and weight, 582 cladodes were randomly collected, with 191 primary, 186 secondary and 205 tertiary. Then, the cladodes were individually numbered and weighed. The linear dimensions of length (L), maximum width (W) and thickness (T) of each cladode were measured with a digital caliper. The cladode area was calculated using the gravimetric method. Linear regression, gamma and power models were used to explain the cladode area and weight. The evaluation criteria of the models were determination coefficient, Akaike information criterion, sum of squared residue and Willmott index. The power models were the most efficient to explain the area of the cladode (AC) as a function of the product of the length by the width, and the weight of the cladode (WC) as a function of the product of the length by the width and thickness. The power models, $\overline{AC}=LW^{0.985}$ and $\overline{WC}=0,0045(T^{0,806}LW^{1,099})$, can be used with greater precision to estimate, respectively, the cladode area and weight of the *Nopalea cochenillifera* Little Sweet clone based on the values of the linear dimensions of the cladode.

Keywords: Non-destructive method; Modelling; *Nopalea cochenillifera*.

Resumen

La palma es uno de los principales forrajes utilizados para alimentar a los rumiantes en las regiones semiáridas. Las mediciones de área y peso de cladodio son necesarias en estudios agronómicos, siendo uno de los principales parámetros utilizados para evaluar el crecimiento de cactus. Así, el objetivo fue definir los mejores modelos para estimar el área y peso del cladodio forrajero (*Nopalea cochenillifera* clon Doce Miúda) de forma no destructiva en base a las dimensiones lineales del cladodio. Para determinar el área y el peso de los cladodios, se recolectaron aleatoriamente 582 cladodios, con 191 primarios, 186 secundarios y 205 terciarios. Luego, los cladodios se numeraron y pesaron individualmente. Las dimensiones lineales de longitud (C), ancho máximo (L) y espesor (E) de cada cladodio se midieron con un calibre digital. El área de cladodio se calculó mediante el método gravimétrico. Se utilizaron modelos de regresión lineal, gamma y potencia para explicar el área y el peso del cladodio. Los criterios de evaluación de los modelos fueron coeficiente de determinación, criterio de información de Akaike, suma de residuos al cuadrado e índice de Willmott. Los modelos de potencia fueron los más eficientes para explicar el área del cladodio (AC) en función del

producto de la longitud por el ancho y el peso del cladodio (PC) en función del producto de la longitud por el ancho y el espesor. Los modelos potencia, $\overline{AC} = CL^{0.985}$ e $\overline{PC} = 0,0045(E^{0,806} CL^{1,099})$, pueden utilizarse con mayor precisión para estimar, respectivamente, el área de cladodio y el peso del clon Doce Miúda basado en los valores de las dimensiones lineales del cladodio.

Palabras clave: Método no destructivo; Modelado; *Nopalea cochenillifera*.

1. Introdução

Espécies adaptadas a ambientes áridos e semiáridos, como as cactáceas (*Nopalea* spp. e *Opuntia* spp.), podem contribuir para o aumento da produção de biomassa em áreas agrícolas, melhorando a eficiência do uso dos recursos naturais locais (Diniz et al., 2017).

As cactáceas destacam-se na produção de frutos para consumo humano e como alternativa forrageira em regiões semiáridas, sendo amplamente utilizadas na alimentação de ruminantes, devido ao seu alto potencial de produção de fitomassa, alto valor energético, riqueza de carboidratos não fibrosos, alta aceitabilidade, alto coeficiente de digestibilidade, grande reserva de água e fácil propagação (Freire et al., 2018; Pereira, Leite, Cavalcante, & Lucena, 2018; Knupp et al., 2019).

Adaptada às condições ambientais com altos índices de evaporação atmosférica e reduzido conteúdo de água nos solos, devido suas características anatômicas e morfofisiológicas, a palma forrageira vem sendo largamente cultivada na região Nordeste do Brasil, notadamente nas bacias leiteiras, sendo as maiores áreas de cultivo encontradas nos Estados de Alagoas, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Sergipe (Leite, Silva, Andrade, Pereira, & Ramos, 2014).

Um dos fatores determinantes da elevada produção de biomassa é a eficiência fotossintética, com absorção e uso da radiação solar na fotossíntese, função realizada pelos cladódios nos cactos (Cavalcante, Santos, Silva, Fagundes, & Silva, 2014). As cactáceas empregam o metabolismo fotossintético MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), com fechamento diurno de estômatos e assimilação noturna de CO₂, proporcionando maior capacidade de adaptação a fatores abióticos (Santos et al., 2016; Souza Filho, Ribeiro, Santos, & Macedo, 2016). O número de estômatos nos cladódios da palma é baixo, de 10 a 30 por mm², enquanto as folhas de plantas C₃ apresentam 300 estômatos por mm². Além disso, os estômatos dos cactos podem ser fechados por vários meses em situações de estresse hídrico

(Liguori, Inglese, Pernice, Sortino, & Inglese, 2013).

Todas essas adaptações anatômicas e morfofisiológicas adquiridas evolutivamente pelas cactáceas contribuíram para o alto sucesso agroecológico dessa cultura; principalmente a alta absorção de água e eficiência de uso, resultando em sua plena adaptabilidade às condições ambientais que envolvem alta demanda evaporativa atmosférica e menor teor de água no solo (Hartzell, Bartlett, & Porporato, 2018; Winter, Garcia, & Holtum, 2011).

O rendimento desta cultura é influenciado principalmente pela interceptação de luz, que por sua vez é determinada por características morfológicas, como a área do cladódio (Pinheiro et al., 2014). A determinação da área fotossintética da planta, folha ou cladódio, é uma ferramenta fundamental no estudo da intensidade da transpiração, taxa de área foliar, área foliar específica e índice de área foliar (Schmildt, Amaral, Schmildt, & Santos, 2014). Para espécies como as cactáceas, que não possuem folhas, a área foliar é substituída pela área de cladódio. Assim, o índice de área de cladódio é um parâmetro relacionado à capacidade de fotossíntese dos cactos.

Para determinação da área de cladódio são utilizados métodos indiretos e não destrutivos, permitindo avaliações sucessivas do mesmo cladódio (Lucena et al., 2019). O desenvolvimento de modelos de regressão a partir das medidas lineares de folhas para determinar a área foliar tem sido muito útil no estudo do crescimento e desenvolvimento das plantas (Achten et al., 2010). Os modelos matemáticos são vantajosos porque são rápidos, não destroem as plantas e são fáceis de manusear em condições de campo (Leite, Lucena, Cruz, Sá Júnior, & Simões, 2019).

Diversos estudos utilizando dimensões lineares na estimativa da área de cladódio foram estabelecidos para várias espécies de cactáceas [*Opuntia ficus-indica* (Reis, Gazarini, Fonseca, & Ribeiro, 2016), *O. stricta* (Lucena, Leite, Simões, Simões, & Almeida, 2018), *Nopalea cochenillifera* (Lucena et al., 2019)], e geraram equações com alta precisão.

Apesar dos significativos avanços científicos em relação às características agronômicas e manejo da espécie *N. cochenillifera*, são escassos os estudos sobre a estimativa de área e peso de cladódio, utilizando as dimensões lineares como variável explicativa. Desse modo, objetivou-se definir os melhores modelos para estimar de maneira não destrutiva a área e o peso do cladódio de *N. cochenillifera*, clone Doce Miúda, com base em suas dimensões lineares.

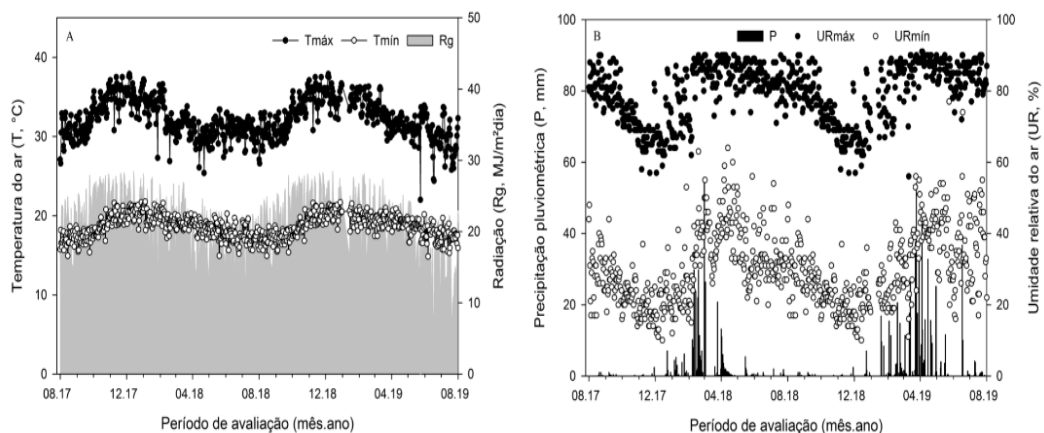
2. Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida na área experimental do Grupo de Estudos em Forragicultura (GEFOR) da Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, microrregião do Sertão do Pajeú (Altitude: 429 m, latitude: 7° 56' 15" S e longitude: 38° 18' 45" O), por meio da pesquisa exploratória de validação e definição de modelos (Pereira et al., 2018). Conforme a classificação de Köppen, o clima enquadra-se no tipo BSw'h', classificando-se como Semiárido, quente e seco, chuvas concentrando-se com maiores acumulados no período de janeiro a abril, pluviosidade média anual de 632 mm ano⁻¹ e temperaturas do ar médias superiores a 25 °C (Leite, Lucena, Sá Junior, & Cruz, 2017).

O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico, apresentando nos primeiros 20 cm, os seguintes atributos: pH (água) = 6,80; P (Mehlich) = 40,0 mg dm⁻³; K⁺ = 0,45 cmol_c dm⁻³; Na⁺ = 0,6 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 5,30 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 1,10 cmol_c dm⁻³; H + Al = 1,23 cmol_c dm⁻³; S = 6,91 cmol_c dm⁻³; CTC = 8,14 cmol_c dm⁻³; V% = 84,89%; matéria orgânica = 7,93 g kg⁻¹; areia = 828,6 g kg⁻¹; silte = 148,25 g kg⁻¹; argila = 23,15 g kg⁻¹ e densidade do solo de 1,45 g dm⁻³.

Os dados meteorológicos do período experimental (Figura 1) foram obtidos de uma estação meteorológica automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, www.inmet.gov.br), localizada na área experimental.

Figura 1. Temperatura do ar, radiação solar global (A), variação da precipitação pluvial, umidade relativa do ar (B), durante o período de agosto de 2017 a agosto de 2019.



Fonte: INMET.

A unidade experimental (área de 24,0 m²; 5,0 m x 4,8 m) foi composta por três fileiras de palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* clone Doce Miúda), com 25 plantas por fileira, perfazendo 75 plantas por unidade experimental. O espaçamento adotado na cultura da palma foi 1,60 m entre linhas e 0,20 m entre plantas, com densidade populacional de 31.250 plantas ha⁻¹ (Figura 2).

Figura 2. Unidade experimental de palma forrageira clone Doce Miúda.



Fonte: Autores.

Os cladódios-semente de palma utilizados no ensaio foram provenientes de plantas com idade aproximada de três anos, originados do GEFOR. O plantio foi realizado em 23/08/2017, após a cura dos cladódios (08 dias), inserindo um cladódio por cova, na posição vertical, em profundidade aproximada de 15 cm. Na escolha dos cladódios para o plantio, foram considerados critérios básicos, como, tamanho, aparência do cladódio e ausência visual de infestação/ataque de pragas ou doenças.

Para determinar a área e peso de cladódio da palma forrageira clone Doce Miúda foram coletados aleatoriamente, 582 cladódios, sendo 191 primários, 186 secundários e 205 terciários, livres de danos e ataques de doenças ou pragas, em distintos estádios de crescimento e, conseqüentemente, com diferentes tamanhos (Figura 3), conforme metodologias já consagradas na literatura em várias culturas tais como, café (Schmidt et al., 2014), capim-corrente (Leite et al., 2017), milho (Leite et al., 2019) e palma forrageira (Lucena et al., 2018).

Figura 3. Diferentes tamanhos de cladódios do clone Doce Miúda.



Fonte: Autores.

Em seguida, os cladódios foram numerados (1 a 582) e mensurados individualmente: comprimento (C, em cm), largura máxima (L, em cm) e espessura (E, em mm) (Figura 4). Para as medições das dimensões dos cladódios utilizou-se uma fita milimétrica e paquímetro digital. O comprimento foi medido da base ao ápice do cladódio, a largura máxima considerada foi na parte mediana do cladódio, ponto mais largo entre uma lateral e outra do cladódio e a espessura, a distância entre as faces opostas de maior área superficial do cladódio. Com os dados de C e de L, também foi obtido o produto entre C e L ($C \cdot L$, em cm^2). Os cladódios foram pesados em balança de precisão e seus valores registrados em gramas (g).

Figura 4. Identificação individual do cladódio terciário (80 T) do clone Doce Miúda.



Fonte: Autores.

Em seguida, cada cladódio foi cuidadosamente contornado com grafite sobre folhas de papel milimetrado, formando-se assim, desenhos de cladódios com dimensões iguais ao cladódio analisado, conforme metodologia descrita por Leite et al. (2017). Esses contornos foram cortados com tesoura e pesados em balança analítica, anotando-se todas as casas decimais para minimizar a margem de erros. Após esse procedimento, foi recortado um quadrado de papel da mesma procedência dos desenhos anteriores, com dimensão de 10 cm x 10 cm, equivalente a 100 cm². Esse quadrado recortado foi pesado em balança eletrônica com peso de 0,630 g.

Assim, sabendo-se a massa equivalente a 100 cm² de papel milimetrado, foi possível determinar, de forma proporcional, a área de cladódio de cada cladódio analisado da palma forrageira Doce Miúda.

Utilizando-se dos dados das dimensões dos cladódios, foi realizado o estudo de análise de regressão da área real de cada cladódio (ARC), considerada como variável dependente (Y_i), e o produto do comprimento pela largura do cladódio (CL_i), variável independente, para determinar assim, as equações de regressão para estimativa da área de cladódio da palma forrageira Doce Miúda. De maneira similar, foi realizado o estudo do modelo de melhor ajuste para prever o peso de cladódio em função da espessura (E) e do produto entre C e L (CL_i).

Para a escolha dos modelos mais adequados para estimar a área e peso de cladódio da palma forrageira em função das dimensões lineares, procederam-se estudos de regressão utilizando os modelos: linear com distribuição normal e potência, assumindo que a resposta da variável dependente esteja no intervalo $(-\infty; \infty)$, linear com distribuição gamma, assumindo que a resposta da variável dependente esteja no intervalo $(0 ; \infty)$ e o modelo potência (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos de regressão para explicar a área real do cladódio (ARC) e o peso do cladódio (PC) da palma forrageira clone Doce Miúda em relação às variáveis explicativas, produto do comprimento pela largura (CL) e espessura (E).

Modelos	Equação	
Linear	$ARC_i = \beta_0 + \beta_1 CL_i + \varepsilon_i$	$PC_i = \beta_1 E_i + \beta_2 CL_i + \varepsilon_i$
Potência	$ARC_i = \beta_0 CL_i^{\beta_1} \varepsilon_i$	$PC_i = \beta_0 E_i^{\beta_1} CL_i^{\beta_2} \varepsilon_i$
Gamma	$ARC_i = \beta_0 + \beta_1 CL_i + \varepsilon_i$	$PC_i = \beta_0 + \beta_1 E_i + \beta_2 CL_i + \varepsilon_i$

Sejam ARC_i a i -ésima área de cladódio; PC_i o peso do i -ésimo cladódio; C_i o comprimento do i -ésimo cladódio; L_i a largura do i -ésimo cladódio; E_i a espessura do i -ésimo cladódio; CL_i o produto entre comprimento e a largura do i -ésimo cladódio; e ε_i o i -ésimo erro associado a área de cladódio, em que ε_i apresenta distribuição normal de média 0 e variância constante $\sigma^2 > 0$ para os modelos linear e potência e distribuição Gamma de parâmetros α e β para os modelos Gamma. As incógnitas β_0 e β_1 são os parâmetros associados aos modelos.

Fonte: Autores.

Os modelos foram avaliados pelos seguintes critérios (Tabela 2): alto coeficiente de determinação do modelo (R^2), baixo critério de informação de Akaike (CIA) definido por Akaike (1974), baixa soma de quadrado de resíduo (SQR) e alto índice de Willmott (d), definido por Willmott (1981).

Tabela 2. Critérios de avaliação de modelos.

Critérios de avaliação de modelos	
R^2	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$
CIA	$-2 \ln L(x \hat{\theta}) + 2(p)$
SQR	$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$
d	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y} + Y_i - \bar{Y})^2}$

R^2 - Coeficiente de determinação do modelo, CIA - Critério de informação de Akaike, SQR - Soma de quadrado de resíduo, d - Índice de Willmott, $L(x|\hat{\theta})$ - função de máxima verossimilhança, definida como sendo o produto da função de densidade, p é a quantidade de parâmetros do modelo, \hat{Y}_i os valores da i -ésima área de cladódio, respectivamente após o ajuste do modelo, \bar{Y} é a média dos valores da área de cladódio (Y_i) da palma forrageira. Fonte: Autores.

Para avaliar as correlações entre as variáveis, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, definido por:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$$

Onde, Y_i e X_i são as i -ésimas observações das variáveis Y e X , enquanto \bar{Y} e \bar{X} são as médias das variáveis Y e X , respectivamente. Testes t-student foram usados para avaliar a significância da correlação entre as variáveis.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 3 mostra uma baixa variação no tamanho do cladódio do clone Doce Miúda, independentemente da ordem do cladódio. O comprimento médio do cladódio variou de $17,4 \pm 3,37$ cm nos cladódios primários a $20,3 \pm 3,9$ cm nos cladódios secundários. Variações semelhantes ocorreram para a largura do cladódio, nos cladódios primários ($7,1 \pm 1,2$ cm) e cladódios secundários ($8,8 \pm 1,6$ cm).

A espessura dos cladódios variou de 10,9 mm (terciário) a 17,4 mm (primário). A área real média do cladódio variou de $163,0 \pm 54,4$ cm² nos cladódios secundários a $109,2 \pm 39,1$ cm² nos cladódios primários.

Os cladódios secundários foram os mais pesados ($160,2 \pm 78,6$ g), e os cladódios mais leves foram os terciários ($95,9 \pm 56,5$ g). Os pesos dos cladódios apresentaram alta dispersão, com cladódios terciários pesando 5,0 g e cladódios secundários pesando 530,0 g. Essa alta variação no tamanho dos cladódios provavelmente ocorreu porque alguns cladódios estavam em expansão, enquanto outros estavam totalmente expandidos, o que é uma característica peculiar de crescimento da palma forrageira.

Tabela 3. Medidas descritivas do cladódio de palma forrageira clone Doce Miúda: área real do cladódio (ARC), comprimento (C), largura (L), produto do comprimento e largura (CL), peso de cladódio (PC) e espessura (E).

Variáveis	Mínimo	Média	Desvio padrão	Máximo
Cladódio Primário				
ARC (cm ²)	42,4	109,2	39,1	279,2
C (cm)	11,0	17,4	3,7	29,7
L (cm)	3,9	7,1	1,2	11,9
CL (cm ²)	45,1	126,0	43,5	339,8
PC (g)	20,0	120,5	75,3	505,0
E (mm)	6,1	17,4	7,4	80,3
Cladódio Secundário				
ARC (cm ²)	36,1	163,0	54,4	412,5
C (cm)	7,5	20,3	3,9	36,0
L (cm)	4,6	8,8	1,6	14,7
CL (cm ²)	34,4	181,4	60,4	443,7
P (g)	20,0	160,2	78,6	530,0
E (mm)	5,8	14,7	3,6	25,2
Cladódio Terciário				
ARC (cm ²)	24,5	133,7	45,5	250,2
C (cm)	9,1	18,7	3,6	27,1
L (cm)	2,5	7,6	1,8	12,1
CL (cm ²)	23,2	146,6	53,7	287,0
P (g)	5,0	95,9	56,5	315,0
E (mm)	3,9	10,9	3,5	20,7

Fonte: Autores.

Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2015) relacionando as características morfológicas e produtivas do clone Doce Miúda aos 720 dias após o plantio (DAP), com comprimento médio do cladódio de: 14,08 cm (primário), 17,27 cm (secundário), 13,74 (terciário), largura média do cladódio de: 9,33 cm (primário), secundário), 6,97 cm (terciário), espessura média do cladódio de: 25,4 mm (primário), 8,78 mm (secundário) e 9,33 (terciário). Gomes, Queiroz, Pereira, Costa, & Oliveira (2016) aos 210 DAP verificaram no clone Doce Miúda, médias de comprimento, largura, espessura e área no cladódio primário de 12,57 cm, 5,45 cm, 7,13 mm e 42,3 cm², respectivamente. No cladódio secundário, esses autores encontraram comprimento médio de cladódio de 9,7 cm, largura de 4,8 cm, espessura de 5,5 mm e área de 34,95 cm².

Na Tabela 4 observou-se alta correlação positiva entre a área real do cladódio (ARC) e o produto do comprimento e largura (CL) ($r = 0,96$; $p < 0,0001$) de cladódio primário, entre a ARC e o peso de cladódio (PC) ($r = 0,79$; $p < 0,0001$) e entre o PC e o CL ($r = 0,81$; $p < 0,0001$). Para cladódios secundários, a ARC foi positivamente correlacionada com CL ($r =$

0,98; $p < 0,0001$) e PC ($r = 0,91$; $p < 0,0001$), e PC foi positivamente correlacionada com CL ($r = 0,92$; $p < 0,0001$) e E ($r = 0,72$; $p < 0,0001$). Houve alta correlação positiva entre ARC e CL ($r = 0,97$; $p < 0,0001$) dos cladódios terciários, entre ARC e PC ($r = 0,86$; $p < 0,0001$), PC e CL ($r = 0,90$; $p < 0,0001$), e PC e espessura (E) ($r = 0,77$; $p < 0,0001$).

Tabela 4. Correlação entre a área real do cladódio (ARC), produto de comprimento e largura (CL), peso de cladódio (PC) e espessura (E) de *Nopalea cochenillifera* clone Doce Miúda.

Cladódio Primário				
	ARC	CL	PC	E
ARC(cm ²)	1,00	---	---	---
CL (cm ²)	0,96*	1,00	---	---
PC (g)	0,79*	0,81*	1,00	---
E(mm)	0,27*	0,30*	0,57*	1,00
Cladódio Secundário				
	ARC	CL	Pg	E
ARC(cm ²)	1,00	---	---	---
CL (cm ²)	0,98*	1,00	---	---
PC (g)	0,91*	0,92*	1,00	---
E (mm)	0,50*	0,52*	0,72*	1,00
Cladódio Terciário				
	ARC	CL	Pg	E
ARC(cm ²)	1,00	---	---	---
CL (cm ²)	0,97*	1,00	---	---
PC (g)	0,86*	0,90*	1,00	---
E (mm)	0,52*	0,57*	0,77*	1,00

* Teste t- student significativo ($p < 0,005$). Fonte: Autores.

Cunha et al. (2012) observaram uma pequena correlação positiva do peso do cladódio com o comprimento ($r = 0,59$), largura ($r = 0,61$), espessura ($r = 0,73$) e área de cladódio ($r = 0,65$) em Doce Miúda. Lucena et al. (2019) observaram em *N. cochenillifera*, clone Doce Gigante uma alta correlação positiva da área real do cladódio com CL no cladódio primário ($r = 0,95$), no cladódio secundário ($r = 0,98$) e no cladódio terciário ($r = 0,96$). Independentemente da ordem do cladódio, uma correlação positiva entre ARC e o produto comprimento por largura foi relatada por Lucena et al. (2018) no clone Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta*) ($r = 0,90$) e por Reis et al. (2016) em *Opuntia ficus-indica* ($r = 0,95$). Guimarães, Donato, Azevedo, Aspiazú, & Silva Jr. (2018) também verificaram correlação positiva do peso de cladódio com a área do cladódio de 0,86 em *O. ficus-indica*.

Avaliando a relação entre a ARC e o CL dos cladódios primários verificou-se que o modelo de regressão linear apresentou um poder explicativo (R^2) de 99,19%, enquanto o modelo potência teve um R^2 de 99,98%, e o modelo gama de 92,91 % (Tabela 5). O modelo

de regressão linear mostrou uma soma de quadrado de resíduos (SQR) de 2.0587,53, enquanto o modelo potência apresentou um SQR de 20318,73. O modelo linear apresentou um critério de informação de Akaike (CIA) de 1439,95, sendo 351,96 no modelo potência e 1414,1 no modelo gama. Todos os modelos apresentaram índice de Willmott (d) de 0,981 (Tabela 5). O modelo que apresentou o melhor resultado para os cladódios primários foi o modelo potência seguido do modelo linear.

Para todas as ordens e independentemente da ordem do cladódio, os modelos apresentaram resultados satisfatórios para os quatro critérios de adequação do modelo, indicando boas adequações dos modelos.

Tabela 5. Estimativas de parâmetros e critérios de adequação do modelo da área real do cladódio (ARC) de *Nopalea cochenillifera* clone Doce Miúda, levando em consideração o produto comprimento e largura (CL) como variável explicativa.

Modelos	Equação da área real do cladódio	Critérios de adequação do modelo			
		R ²	SQR	CIA	d
Cladódio Primário					
Linear	$\widehat{ARC}=0,866CL$	99,19	20587,53	1439,95	0,981
Potência	$\widehat{ARC}=CL^{0,969}$	99,98	20318,73	351,96	0,981
Gamma	$\widehat{ARC}=0,866CL$	92,91	20587,56	1414,1	0,981
Cladódio Secundário					
Linear	$\widehat{ARC}=0,897CL$	95,13	26596,67	1454,93	0,988
Potência	$\widehat{ARC}=CL^{0,986}$	99,99	26418,73	456,52	0,989
Gamma	$\widehat{ARC}=0,901CL$	95,11	26751,63	1420,4	0,988
Cladódio Terciário					
Linear	$\widehat{ARC}=0,901CL$	92,71	30806,08	1613,32	0,983
Potência	$\widehat{ARC}=CL^{0,989}$	99,98	30416,12	392,92	0,983
Gamma	$\widehat{ARC}=0,927CL$	91,94	34019,39	1596,4	0,981
Independentemente da Ordem de Cladódio					
Linear	$\widehat{ARC}=0,891CL$	99,33	80784,54	4526,7	0,987
Potência	$\widehat{ARC}=CL^{0,977}$	99,98	79972,75	1131,4	0,987
Gamma	$\widehat{ARC}=0,899CL$	94,68	81611,97	4498,2	0,987

R² - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrado dos resíduos; CIA- critérios de informação de Akaike; d - índice de Willmott. Fonte: Autores.

Resultados semelhantes foram relatados em *N. cochenillifera*, clone Doce Gigante usando modelo potência e poder explicativo de 99,91%, independentemente da ordem do cladódio (Lucena et al., 2019). Silva et al. (2014) em *N. cochenillifera* clone Doce Miúda,

Lucena et al. (2018) em *Opuntia stricita* e Reis et al. (2016) em *Opuntia ficus-indica*, verificaram a relação da área de cladódio em função do produto do comprimento pela largura por meio de modelos de regressão linear que apresentaram poderes explicativos de 96,96%, 96,66% e 91%, respectivamente.

Na avaliação do peso de cladódio primário em função da espessura e do produto comprimento por largura, verificou-se que o modelo potência apresentou os melhores resultados, com R² de 96,85%, SQR de 168250,8, CIA de 68,68 e índice de Willmott de 0,957 (Tabela 6). Verificando os quatro critérios de adequação dos modelos, o modelo potência é o modelo mais adequado para explicar a relação entre o peso de cladódio primário em função da espessura e do produto comprimento pela largura em relação aos modelos linear e gama.

Tabela 6. Estimativas de parâmetros e critérios de adequação do modelo do peso de cladódio (PC) de *Nopalea cochenillifera* clone Doce Miúda, levando em consideração a espessura (E) e o produto comprimento e largura (CL) como variável explicativa.

Modelos	Equação do peso do cladódio	Critérios de adequação do modelo			
		R ²	SQR	CIA	d
Cladódio Primário					
Linear	$\widehat{PC}=1,803E+0,077CL$	89,72	391690,9	2004,59	0,839
Potência	$\widehat{PC}=0,073(E^{0,763} CL^{1,072})$	96,85	168250,8	68,68	0,957
Gamma	$\widehat{PC}=-60,27+4,9E+0,73CL$	69,65	326660,9	1727,6	0,894
Cladódio Secundário					
Linear	$\widehat{PC}=-120,4+7,02E+0,979CL$	92,74	82998,63	1670,6	0,981
Potência	$\widehat{PC}=0,087(E^{0,723} CL^{1,065})$	95,80	68547,51	307,91	0,984
Gamma	$\widehat{PC}=-85,01+7,3E+0,745CL$	89,57	119169,6	1610,7	0,967
Cladódio Terciário					
Linear	$\widehat{PC}=-76,81+6,30E+0,71CL$	90,78	59451,84	1752,1	0,976
Potência	$\widehat{PC}=0,049(E^{0,761} CL^{1,141})$	95,33	37296,17	170,94	0,985
Gamma	$\widehat{PC}=-26,54+3,87E+0,51CL$	80,80	125069,5	1779,3	0,929
Independentemente da Ordem de Cladódio					
Linear	$\widehat{PC}=-93,4+5,05E+0,968CL$	85,50	475124,1	5561,87	0,960
Potência	$\widehat{PC}=0,057(E^{0,806} CL^{1,099})$	93,72	290572,1	471,28	0,977
Gamma	$\widehat{PC}=-33,19+4,46E+0,58CL$	85,23	516491,7	5343,4	0,900

R² - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrado dos resíduos; CIA- critérios de informação de Akaike; d - índice de Willmott. Fonte: Autores.

Na avaliação da relação entre o peso, a espessura e o produto do comprimento pela largura dos cladódios secundários, o modelo potência apresentou o maior coeficiente de determinação do modelo (95,80%), menor soma de quadrado de resíduos (68547,51) e critério de informação de Akaike (307,91) e maior índice de Willmott (0,984) (Tabela 6). Verificando os critérios de adequação do modelo, o modelo potência também foi o mais adequado para explicar a relação entre o peso dos cladódios secundários em função da espessura e o produto comprimento pela largura em comparação com os outros modelos.

De forma similar, o modelo potência apresentou o melhor desempenho para os cladódios terciários com os melhores critérios de adequação do modelo: R^2 (95,33%), SQR (37296,17), CIA (170,94) e índice de Willmott (0,985) em relação aos modelos linear e gama (Tabela 6).

Independentemente da ordem de cladódio avaliado, o modelo potência também foi o mais adequado para explicar o peso de cladódios por apresentar os maiores R^2 (93,72%) e índice de Willmott (0,977) e menores valores de SQR (290572,1) e CIA (471,28) em relação aos outros modelos avaliados (Tabela 6).

Cunha et al. (2012) em *N. cochenillifera* clone Doce Miúda e Reis et al. (2016) em *Opuntia ficus-indica* utilizando como variável explicativa o produto entre comprimento, largura e espessura verificaram que o peso de cladódio pode ser estimado por um modelo de regressão linear com precisão de 90,57% e 91%, respectivamente. O modelo de regressão quadrática foi utilizado para explicar o peso seco dos cladódios de *Opuntia ficus-indica* em função da área de cladódio com poder de precisão de 99% (Cortázar & Nobel, 1992).

4. Conclusão

As dimensões lineares do cladódio são um parâmetro apropriado para uso na predição da área e peso do cladódio do clone Doce Miúda (*Nopalea cochenillifera*) por modelos de regressão.

O modelo potência, $\overline{ARC} = CL^{0,985}$, pode ser usado com maior precisão, para estimar a área do cladódio do clone Doce Miúda com base nos valores de comprimento e largura do cladódio.

O modelo potência, $\overline{PC} = 0,0045(E^{0,806} CL^{1,099})$, pode ser utilizado para estimar o peso de cladódio do clone Doce Miúda com base nos valores de espessura, comprimento e largura do cladódio.

A adoção de modelos permite estimar de forma não destrutiva a área e peso de cladódio da palma forrageira clone Doce Miúda com alta precisão, rapidez e baixo custo, sendo necessária apenas a medição das dimensões lineares do cladódio.

O uso de técnicas de modelagem no estudo do crescimento e desenvolvimento das plantas poderá contribuir para aumentar a eficiência, a viabilidade bioeconômica e a sustentabilidade da produção vegetal em escala comercial. Para melhorar os resultados encontrados, novos estudos devem ser desenvolvidos para predição da massa seca de cladódio e composição químico-bromatológica da palma forrageira clone Doce Miúda.

Referências

Achten, W. M. J., Maes, W. H., Reubens, B.; Mathijs, E., Singh, V. P., Verchot, L. V., & Muys, B. (2010). Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 667-676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.010>

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, 716-723. doi: 10.1109/TAC.1974.1100705

Cavalcante, L. A. D., Santos, G. R. D. A., Silva, L. M. D., Fagundes, J. L., & Silva, M. A. D. (2014). Respostas de genótipos de palma forrageira a diferentes densidades de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(4), 424-433. DOI: 10.1590/S1983-40632014000400010.

Cortazar, V. G., & Nobel, P. S. (1992). Biomass and Fruit Production for the Prickly Pear Cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Journal American Society Horticulture Science*, 117(4), 558-562.

Cunha, D. N. F. V., Gomes, E. S., Martuscello, J. A., Amorim, P. L., Silva, R. C., & Ferreira, P. S. (2012). Morfometria e acúmulo de biomassa em palma forrageira sob doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 13(4), 1156-1165. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-99402012000400005>

Diniz, W. J. S., Silva, T. G. F., Ferreira, J. M. S., Santos, D. C., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., & Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9), 724-733. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900004>

Freire, J. L., Santos, M. V. F. Dubeux Jr., J. C. B., Neto, E. B., Lira, M. A., Cunha, M. V., Djalma, C. S., Amorim, S. O., & Mello, A. C. L. (2018). Growth of cactus pear cv. Miúda under different salinity levels and irrigation frequencies. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(4), 3893-3900. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820171033>

Gomes, M. L. S., Queiroz, M. J., Pereira, F. C., Costa, D. B., & Oliveira, G. S. (2016). Caracterização biométrica de artículos da palma miúda (*Nopalea cochenillifera*) em função da adubação orgânica. *Revista Principia*, 2(9), 39-45. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n29p39-45>

Guimarães, B. V. C., Donato, S. L. R., Azevedo, A. M., Aspiazú, I., & Silva Jr., A. A. (2018). Prediction of 'Gigante' cactus pear yield by morphological characters and artificial neural networks. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(5), 315-319. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p315-319>

Hartzell, S., Bartlett, M. S., & Porporato, A. (2018). Unified representation of the C3, C4, and CAM photosynthetic pathways with the Photo3 model. *Ecological Modelling*, 384, 173-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.06.012>

Knupp, L. S., Carvalho, F. F. R., Cannas, A., Marcondes, M. I., Silva, A. L., Francesconi, A. H. D., Cruz, G. B., Atzori, A. S., Gaspa, G., & Costa, R. G. (2019). Meta-analysis of spineless cactus feeding to meat lambs: performance and development of mathematical models to predict dry matter intake and average daily gain. *Animal*, 13(10), 2260-2267. DOI: [10.1017/S1751731119000326](https://doi.org/10.1017/S1751731119000326)

Leite, M. L. M. V., Silva, D. S., Andrade, A. P., Pereira, W. E., & Ramos, J. P. F. (2014). Caracterização da produção de palma forrageira no Cariri paraibano. *Revista Caatinga*, 27(2), 192-200. https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/2830/pdf_128

Leite, M. L. M. V., Lucena, L. R. R., Sá Júnior, E. H., & Cruz, M. G. (2017). Estimativa da área foliar em *Urochloa mosambicensis* por dimensões lineares. *Revista Agropecuária Técnica*, 38(1), 9-17. doi: doi.org/10.25066/agrotec.v38i1.32041.

Leite, M. L. M. V., Lucena, L. R. R., Cruz, M. G., Sá Júnior, E. H., & Simões, V. J. L. P. (2019). Leaf area estimate of *Pennisetum glaucum* by linear dimensions. *Acta Scientiarum Animal Sciences*, 41, e42808. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.42808>

Liguori, G., Inglese, G., Pernice, F., Sortino, G., & Inglese, P. (2013). CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole tress and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. *Italian Journal of Agronomy*, 8(1), 14-20. DOI: <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e3>

Lucena, L. R. R., Leite, M. L. M. V., Simões, V. J. L. P., Simões, V. J. L. P., & Almeida, M. C. R. (2018). Área de cladódio de palma *Opuntia stricta* utilizando dimensões lineares. *Agrarian Academy*, 5(9), 46-55. DOI: https://doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2018a5

Lucena, L. R. R., Leite, M. L. M. V., Cruz Jr., C. B., Carvalho, J. D., Santos, E. R., & Oliveira, A. D. M. (2019). Estimation of cladode area of *Nopalea cochenillifera* using digital images. *JPACD*, 1, 32-42.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [e-book]. Santa Maria: Ed. UAB/NTE/UFSM. Recuperado de https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_MetodologiaPesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1

Pereira, J. S., Leite, M. L. M. V., Cavalcante, A. B., & Lucena, L. R. R. (2018). Crescimento inicial de *Nopalea cochenillifera* em função do fracionamento do cladódio. *Revista Agropecuária Técnica*, 39(2), 120-128. DOI: <https://doi.org/10.25066/agrotec.v39i2.37995>

Pinheiro, K. M., Silva, T. G. F., Carvalho, H. F. S., Santos, J. E. O., Morais, J. E. F., Zolnier, S., & 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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X201400120000>

Reis, C. M. G., Gazarini, L. C., Fonseca, T. F., & Ribeiro, M. M. (2016). Above-ground biomass estimation of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for forage crop in a mediterranean environment by using non-destructive methods. *Experimental Agriculture*, 54(2), 227-242. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479716000211>

Santos, T. N., Dutra, E. D., Prado, A. G., Leite, F. C. B., Souza, R. F. R., Santos, D. C., Abreu, C. A. M., Simões, D. A., Morais Jr, M. A., & Menezes, R. S. C. (2016). Potential for biofuels from the biomass of prickly pear cladodes: Challenges for bioethanol and biogas production in dry areas. *Biomass and Bioenergy*, 85, 215-222. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.005>

Schmidt, E. R., Amaral, J. A. T., Schmidt, O., & Santos, J. S. (2014). Análise comparativa de equações para estimativa da área foliar em cafeeiros. *Coffee Science*, 9(2), 155-167. DOI: <http://dx.doi.org/10.25186/cs.v9i2.573>

Silva, T. G. F., Miranda, K. R., Santos, D. C., Queiroz, M. G., Silva, M. C., Neto, J. F. C., & Araújo, J. E. M. (2014). Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem, análise e aplicabilidade. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(4), 633-641. DOI: <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v9i4a4553>

Silva, T. G. F., Primo, J. T. A., Morais, J. E. F., Diniz, W. J. S., Souza, C. A. A., & Silva, M. C. (2015). Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. *Revista Caatinga*, 28(2), 10-18.

Souza Filho, P. F., Ribeiro, V. T., Santos, E. S., & Macedo, G. R. (2016). Simultaneous saccharification and fermentation of cactus pear biomass—evaluation of using different pretreatments. *Industrial Crops and Products*, 89, 425-433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.028>

Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical geography*, 2(2), 184-194. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213

Winter, K., Garcia, M. N., & Holtum, J. A. M. (2011). Drought-stress-induced up-regulation of CAM in seedlings of a tropical cactus. *Journal of Experimental Botany*, 62(11), 4037-4042. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/err106>

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Maurício Luiz de Mello Vieira Leite – 40%

Gabrieli Alves de Oliveira – 15%

Leandro Ricardo Rodrigues de Lucena – 20%

Antônio Dennys Melo de Oliveira – 5%

Álefe Chagas de Lima Costa – 5%

Fredson Luan Queiroz dos Anjos – 5%

Carla Barbosa da Silva – 5%

Igor Masterson de Farias – 5%