

Relation of plant height and cladode number of cactus little sweet clone consorted with pornunça

Relación entre altura de la planta y número de cladodios del clon de cactus Little Sweet, asociado con "pornunça"

E. A. Moura, L. R. R. Lucena, M. L. M. V. Leite, G. A. Moura, V. J. L. P. Simões and J. B. Simplicio
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada, PE,
CEP: 56909-535, Brasil
Email: edvaldo10am@hotmail.com

Edvaldo Alves de Moura ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7705-6665>

Leandro Ricardo Rodrigues de Lucena ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6985-7668>

Maurício Luiz de Mello Vieira Leite ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4241-241X>

Geovane Alves de Moura ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8946-3455>

Vicente José Laamon Pinto Simões ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0448-2698>

Josima Bento Simplicio ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7669-0584>

Forage cactus presents high phytomass production in semiarid regions, due to its high energy value, high non-fibrous carbohydrate contents, high acceptability, high water reserves and easy propagation. The aim of this study was to define the best relation between plant height and cladode number of *Nopalea cochenillifera* with and without "pornunça". The design was performed in randomized blocks, with single cacti and "pornunça" consortium, with three repetitions. The experimental unit was composed of three rows of cactus, with spacing between rows of 1.60m and between plants of 0.20m, which is equivalent to a population density of 31,250 plants ha⁻¹. The plant height and cladode number were related through regression models, which were evaluated by four criteria of selection. There was no difference between plant height and cladode number of cactus with and without consortium. The *Nopalea cochenillifera* consortium with "pornunça" is promising, and it presents agronomic viability and advantages. The adoption of the hyperbolic tangent model $H=80.78*\tanh(0.059*DAP^{0.67}CN^{-0.052})$ allows the explanation of the height of *Nopalea cochenillifera*, with high precision and low cost, depending on the age of the plant and total number of cladode per plant.

Key words: *growth curve, hyperbolic tangent, Nopalea cochenillifera*

Species adapted to arid and semi-arid environments, such as forage cactus (*Nopalea spp.* and *Opuntia spp.*), can contribute to an increase of yields in the biomass of agricultural areas, improving the efficiency of use of local natural resources from such environments (Diniz *et al.* 2017 and Freire *et al.* 2018).

Cacti is a xerophilous plant of multiple purposes, and it is used in different countries of all continents as forage, fruit, vegetable, raw material for processing, biomass for energy production, live fence, erosion control, soil conservation, landscaping, dye production, and medicinal uses, among others (Inglese *et al.* 1995). The forage cactus presents CAM (Crassulacean Acid Metabolism) photosynthetic metabolism, with day closure of stomata and nocturnal carbon assimilation,

El cactus forrajero presenta alta producción de fitomasa en regiones semiáridas, debido a su alto valor energético, gran contenido de carbohidratos no fibrosos, elevada aceptabilidad, grandes reservas de agua y fácil propagación. El objetivo de este estudio fue definir la mejor relación entre la altura de la planta y el número de cladodios de *Nopalea cochenillifera* con y sin "pornunça". El diseño se realizó en bloques al azar, con asociación de cactus único y "pornunça", con tres repeticiones. La unidad experimental estuvo compuesta por tres hileras de cactus, con un espacio de 1.60 m entre hileras y 0.20 m entre plantas, lo que equivale a una densidad de población de 31 250 plantas ha⁻¹. La altura de la planta y el número de cladodios se relacionaron mediante modelos de regresión, que fueron evaluados por cuatro criterios de selección. No hubo diferencia entre la altura de la planta y el número de cladodios de cactus con y sin asociación. La asociación de *Nopalea cochenillifera* con "pornunça" es prometedor y presenta ventajas y viabilidad agronómica. La adopción del modelo de tangente hiperbólica $H=80.78 * \tanh (0.059 * DAP^{0.67} CN^{-0.052})$ permite la explicación de la altura de *Nopalea cochenillifera*, con alta precisión y bajo costo, dependiendo de la edad de la planta y el número total de cladodios por planta.

Palabras clave: *curva de crecimiento, tangente hiperbólica, Nopalea cochenillifera*

Las especies adaptadas a ambientes áridos y semiáridos, como los cactus forrajeros (*Nopalea spp.* y *Opuntia spp.*), pueden contribuir al aumento de los rendimientos en la biomasa de las áreas agrícolas, mejorando la eficiencia de uso de los recursos naturales locales de dichos ambientes (Diniz *et al.* 2017 y Freire *et al.* 2018).

El cactus es una planta xerófila de múltiples propósitos, y se usa en diferentes países de todos los continentes como forraje, fruta, verdura, materia prima para procesamiento, biomasa para producción de energía, cerca viva, control de erosión, conservación del suelo, paisajismo, producción de tintes y usos medicinales, entre otros (Inglese *et al.* 1995). El cactus forrajero presenta el metabolismo fotosintético CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas), con cierre diario de estomas y asimilación nocturna de carbono, lo que

which provides a greater adaptive capacity to the abiotic factors (Santos *et al.* 2016 and Souza Filho *et al.* 2016).

Cactus presents high phytomass production in semi-arid regions, with high energy value, high non-fibrous carbohydrate contents, high ruminant acceptability, high digestibility coefficient, high water reserves and easy propagation (Freire *et al.* 2018 and Pereira *et al.* 2018). They are highly efficient in the use of water, making it suitable to the environmental conditions with great rates of atmospheric evaporation and reduction of soil humidity (Winter *et al.* 2011 and Hartzell *et al.* 2018). The yield of this culture is influenced, mainly, by interception of light, which in turn, is determined by morphological characteristics (Pinheiro *et al.* 2014).

Nopalea cochenillifera (L.) Salm-Dyck is cultivated in dry conditions, due to its anatomical-morpho-physiological characteristics that provide good adaptation to the climatic conditions of such region (Freire *et al.* 2018). This species is resistant to carmine cochineal (*Dactylopius opuntiae* Cockerell), the main pest of this type of culture, and therefore, it gains prominence in the properties of the Brazilian semi-arid (Pereira *et al.* 2018).

In most regions where the *Nopalea cochenillifera* culture is crop, are dry regions where they have low water availability and high temperatures, an alternative to such adversities is the consortium with other cultures, because the consortium allows planting in the same area of crops that serve as forage material for animals, in addition to promoting greater light interception directly on the soil, which generates less plant evapotranspiration and consequently better forage development.

The growth curve describes a sequence of measurements, in function of time, of a given plant's morphological characteristic such as height, length, thickness, width, area or diameter. In general, this curve presents aspect of exponential or sigmoidal growth (Lucena *et al.* 2018a), and the proper adjustment of the growth curves is an important tool for the adequate management of a crop (Leite *et al.* 2017). This data generates useful information such as: morphophysiological responses, period of greater plant growth, and which is the most suitable season for fertilization and pest control (Lucena *et al.* 2018a). In the last decades, growth curves in forage cactus have been well studied, as reported in *Nopalea cochenillifera* (Lucena *et al.* 2016 and Freire *et al.* 2018).

Although there is information about the agronomic characteristics of the specie *N. cochenillifera* (Silva *et al.* 2014, Lucena *et al.* 2018b and Freire *et al.* 2018), studies focused on growth curve of this species intercropped with another culture were not detected in the literature. Therefore, the objective of this study is to define the best relation between plant height and

proporciona mayor capacidad de adaptación a los factores abióticos (Santos *et al.* 2016 y Souza Filho *et al.* 2016).

Los cactus presentan alta producción de fitomasa en regiones semiáridas, con alto valor energético, gran contenido de carbohidratos no fibrosos, elevada aceptabilidad por parte de los rumiantes, gran coeficiente de digestibilidad, altas reservas de agua y fácil propagación (Freire *et al.* 2018 y Pereira *et al.* 2018). Son muy eficientes en el uso del agua, lo que los hace adecuados para las condiciones ambientales con altas tasas de evaporación atmosférica y reducción de la humedad del suelo (Winter *et al.* 2011 y Hartzell *et al.* 2018). El rendimiento de este cultivo está influenciado, principalmente, por la intercepción de la luz, que a su vez está determinada por las características morfológicas (Pinheiro *et al.* 2014).

Nopalea cochenillifera (L.) Salm-Dyck se cultiva en condiciones secas, debido a sus características anatómico-morfo-fisiológicas que proporcionan una buena adaptación a las condiciones climáticas de dicha región (Freire *et al.* 2018). Esta especie es resistente a la cochinilla del carmín (*Dactylopius opuntiae* Cockerell), principal plaga de este tipo de cultivo, y, por tanto, gana prominencia en las propiedades del semiárido brasileño (Pereira *et al.* 2018).

La mayoría de las regiones donde se cultiva *Nopalea cochenillifera* son regiones secas que tienen poca disponibilidad de agua y altas temperaturas. Una alternativa ante tales adversidades es la asociación con otros cultivos, porque esta permite plantar cultivos que sirven como material forrajero para animales en la misma área, además de promover una mayor intercepción de la luz directamente en el suelo, lo que genera menos evapotranspiración de las plantas y, en consecuencia, un mejor desarrollo del forraje.

La curva de crecimiento describe la secuencia de mediciones, en función del tiempo, de una característica morfológica de una planta determinada, como altura, longitud, grosor, ancho, área o diámetro. En general, esta curva presenta un aspecto de crecimiento exponencial o sigmoideo (Lucena *et al.* 2018a), y el ajuste adecuado de las curvas de crecimiento es una herramienta importante para el manejo adecuado de un cultivo (Leite *et al.* 2017). Estos datos generan información útil como: respuestas morfofisiológicas, período de mayor crecimiento de la planta y cuál es la estación más adecuada para la fertilización y el control de plagas (Lucena *et al.* 2018a). En las últimas décadas, las curvas de crecimiento en cactus forrajeros han sido muy estudiadas, como se informó en *Nopalea cochenillifera* (Lucena *et al.* 2016 y Freire *et al.* 2018).

Aunque existe información sobre las características agronómicas de la especie *N. cochenillifera* (Silva *et al.* 2014, Lucena *et al.* 2018b y Freire *et al.* 2018), no se encontraron estudios centrados en la curva de crecimiento de esta especie intercalada con otro cultivo. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue definir la mejor relación entre la altura de la planta y el número de cladodios del clon de Little Sweet (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-

cladode number of the forage cactus Little Sweet clone (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck), with and without "pornunça" consortium.

Materials and Methods

The research was carried from August 2017 to January 2019 in an experimental area of the Universidade Federal Rural de Pernambuco (Serra Talhada County Campus, PE, Brazil), located at 07° 57' 01" S, 38° 17' 53" E, at an elevation of 431 m. According to the Köppen, the region climate classification is BSw. Annual average rainfall, air temperature and relative humidity are 632.2 mm, 25 °C and 60 %, respectively (Leite *et al.* 2019).

The soil of the experimental area was classified as Typical Haplic Cambisol Ta Eutrophic. The soil sample was taken at the first 20 cm, and showed the following chemical characteristics: pH(water) = 6.80; P (Mehlich) = 40.00 mg dm⁻³; K⁺ = 0.45 cmolc dm⁻³; Na⁺ = 0.06 cmolc dm⁻³; Ca²⁺ = 5.30 cmolc dm⁻³; Mg²⁺ = 1.10 cmolc dm⁻³; H + Al = 1.23 cmolc dm⁻³; S = 6.91 cmolc dm⁻³; CTC = 8.14 cmolc dm⁻³; V = 84.89%; organic matter = 7.93 g kg⁻¹; sand = 828.6 g kg⁻¹; Silt = 148.25 g kg⁻¹; clay = 23.15 g kg⁻¹, and soil density of 1.45 g dm⁻³.

The experimental design was performed in randomized blocks, with single cacti (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck clone Little Sweet) and "pornunça" consortium (*Manihot glaziovii* x *Manihot esculenta*), with three replicates. The experimental unit (area of 24.0 m², 5.0 m x 4.8 m) was composed of three rows of cactus, planted in August 2017, with spacing between rows of 1.60m and between plants of 0.20m, which is equivalent to the population density of 31,250 plants ha⁻¹. The cladodes used in the propagation of the trial were from plants with an approximate age of three years. The planting occurred after the cure of the cladode (8 days), with the insertion of a cladode per hole, in vertical position, deep enough to bury half of the cladode.

In the consortium cacti x "pornunça", there was the addition of two rows of "pornunça" between the cacti lines. The "pornunça" was planted in October 2017, with a spacing of 1.6m x 1.0m, totaling 6250 plants ha⁻¹. The cacti and "pornunça" have grown under natural conditions of rain (dry), without the use of fertilization, and, during the conduction of the experiment, the control of spontaneous plants was carried out manually, when necessary.

For evaluations of morphogenic characteristics, thirty cactus plants per plot were selected out of the central line, resulting in ninety plants per treatment. Measures of plant height and cladode number per plant of *Nopalea cochenillifera*, clone Little Sweet, were gathered during one year. The first evaluation was performed in January 2017, and the others has a 30-day interval between them, totaling 10 evaluations. The plant height was measured from the base (colon) to the apex of the plant, with the aid of a measuring tape, while the cladode total number

Dyck), asociada con "pornunça" o no.

Materiales y Métodos

La investigación se realizó entre agosto de 2017 y enero de 2019 en un área experimental de la Universidad Federal Rural de Pernambuco (Campus del Condado de Serra Talhada, PE, Brasil), ubicada en 07 ° 57 '01 "S, 38 ° 17' 53" E, a una altura de 431 m. Según Köppen, la clasificación climática de la región es BSw. La precipitación media anual, la temperatura del aire y la humedad relativa son de 632.2 mm, 25 °C y 60 %, respectivamente (Leite *et al.* 2019).

El suelo del área experimental se clasificó como Típico Haplic Cambisol Ta Eutrófico. Se tomó una muestra del suelo a los primeros 20 cm y mostró las siguientes características químicas: pH (agua)=6.80; P (Mehlich)=40.00 mg dm⁻³; K⁺=0.45 cmolc dm⁻³; Na⁺=0.06 cmolc dm⁻³; Ca²⁺=5.30 cmolc dm⁻³; Mg²⁺=1.10 cmolc dm⁻³; H+Al=1.23 cmolc dm⁻³; S=6.91 cmolc dm⁻³; CTC=8.14 cmolc dm⁻³; V=84.89%; materia orgánica=7.93 g kg⁻¹; arena=828.6 g kg⁻¹; limo=148.25 g kg⁻¹; arcilla=23.15 g kg⁻¹, y densidad del suelo de 1.45 g dm⁻³.

El diseño experimental se realizó en bloques al azar, con cactus individuales (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck clon Little Sweet) y en asociación con "pornunça" (*Manihot glaziovii* x *Manihot esculenta*), con tres repeticiones. La unidad experimental (área de 24.0 m², 5.0 m x 4.8 m) estaba compuesta por tres hileras de cactus, plantadas en agosto de 2017, con un espacio de 1.60 m entre hileras y 0.20 m entre plantas, lo que equivale a una densidad de población de 31 250 plantas ha⁻¹. Los cladodios utilizados en la propagación del ensayo fueron de plantas con una edad aproximada de tres años. La siembra ocurrió después del curado del cladodio (8 días), con la inserción de un cladodio por hoyo, en posición vertical, lo suficientemente profundo como para enterrar la mitad del cladodio.

En la asociación cactus x "pornunça", se agregaron dos filas de "pornunça" entre las líneas de cactus. La "pornunça" se plantó en octubre de 2017, con un espacio de 1.6m x 1.0m, para un total de 6 250 plantas ha⁻¹. Los cactus y "pornunça" crecieron en condiciones naturales de lluvia (seco), sin el uso de fertilización y durante la realización del experimento, el control de las plantas espontáneas se realizó manualmente, cuando fue necesario.

Para las evaluaciones de las características morfogénicas, se seleccionaron treinta plantas de cactus por parcela de la línea central, dando como resultado noventa plantas por tratamiento. Durante un año, se tomaron las medidas de altura de la planta y número de cladodios por planta de *Nopalea cochenillifera*, clon Little Sweet. La primera evaluación se realizó en enero de 2017, y las otras tienen un intervalo de 30 días entre ellas, con un total de 10 evaluaciones. La altura de la planta se midió desde la base (colon) hasta el ápice de la planta, con la ayuda de una cinta métrica, mientras que el

per plant was measured by counting.

Results of plant height and cladode total number per plant were expressed by mean and standard error. Mann-Whitney test was applied in order to compare the means of the variables at 5 % probability. The fittest model to predict plant height (H) of *Nopalea cochenillifera* in function of the days after planting (DAP) and cladode number (NC) were performed using the following regression models: linear multiple, power, Gamma, logistic, Gompertz, Weibull, tangent hyperbolic and quadratic (Leite *et al.* 2017 and Lucena *et al.* 2018a) (table 1). The linear multiple, power, logistic, Gompertz, tangent hyperbolic and quadratic models with normal distribution assume that the response of dependent variable is in the range $(-\infty, \infty)$. The Gamma models with Gamma distribution and Weibull models with Weibull distribution assume that the response of dependent variable is in the range $(0, \infty)$ (Lucena *et al.* 2018a and Leite *et al.* 2019) (table 1).

número total de cladodios por planta se midió por conteo.

Los resultados de la altura de la planta y el número total de cladodios por planta se expresaron mediante la media y el error estándar. Se aplicó la prueba de Mann-Whitney para comparar las medias de las variables con una probabilidad del 5 %. El modelo de mejor ajuste para predecir la altura de la planta (H) de *Nopalea cochenillifera* en función de los días posteriores a la siembra (DAP) y el número de cladodio (CN) se realizó utilizando los siguientes modelos de regresión: lineal múltiple, potencia, Gamma, logística, Gompertz, Weibull, tangente hiperbólica y cuadrática (Leite *et al.* 2017 y Lucena *et al.* 2018a) (tabla 1). Los modelos lineal múltiple, potencia, logística, Gompertz, tangente hiperbólica y cuadrática con distribución normal suponen que la respuesta de la variable dependiente está en el rango $(-\infty, \infty)$. Los modelos Gamma con distribución Gamma y los modelos Weibull con distribución Weibull suponen que la respuesta de la variable dependiente está en el rango $(0, \infty)$ (Lucena *et al.* 2018a y Leite *et al.* 2019) (tabla 1).

Table 1. Regression models to explain plant height (H) of *Nopalea cochenillifera* in relation the explanatory variables days after planting (DAP) and cladode number (CN)

Models	Equation of the plant height
Linear multiple	$H_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 CN_i + \epsilon_i$
Power	$H_i = \beta_0 DAP_i^{\beta_1} CN_i^{\beta_2} \epsilon_i$
Gamma	$H_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 CN_i + \epsilon_i$
Logistic	$H_i = \frac{w}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 CN_i)} + \epsilon_i$
Gompertz	$H_i = w * \exp^{-\exp(\beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 CN_i)} + \epsilon_i$
Weibull	$H_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 CN_i + \epsilon_i)$
Hyperbolic T.	$H_i = w * \tanh(\beta_0 DAP_i^{\beta_1} CN_i^{\beta_2} \epsilon_i)$
Quadratic	$H_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i + \beta_2 DAP_i^2 + \beta_3 CN_i + \epsilon_i$

where, H_i the i-th plant height of *Nopalea cochenillifera*; DAP_i the i-th days after planting; CN_i the i-th number of cladode of *Nopalea cochenillifera* and ϵ_i the i-th error interrelated the plant height of *Nopalea cochenillifera*, with ϵ_i exhibited normal distribution of mean 0 and variance constant $\sigma^2 > 0$ to the linear multiple, power, logistic, Gompertz, tangent hyperbolic and quadratic model; gamma distribution of parameters α and β to gamma models and Weibull distribution of parameters α and γ to weibull model. The $w, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ and β_3 are parameters related to the model.

The following criteria evaluated the models: Coefficient of determination of the model (R^2), Akaike’s Information Criterion (AIC), Sum of Square of Residuals (SSR) and the Willmott index (d).

The coefficient of determination of the model is expressed by:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

The Akaike information criteria (AIC), as defined by Akaike (1974), is given by:

$$AIC = -2 \ln L(x/\theta) + 2(p)$$

The sum of square of the residuals (SSR) is the square sum of the difference between the values observed and predicted by the models, where the lowest value contributes to the choice of the best equation. The SSR for this study was defined by the following expression:

Los siguientes criterios evaluaron los modelos: Coeficiente de determinación del modelo (R^2), Criterio de información de Akaike (AIC), suma del cuadrado de residuos (SSR) y el índice de Willmott (d).

El coeficiente de determinación del modelo se expresa mediante:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

El criterio de información de Akaike (AIC), definido por Akaike (1974), está dado por:

$$AIC = -2 \ln L(x/\theta) + 2(p)$$

La suma del cuadrado de los residuos (SSR) es la suma cuadrada de la diferencia entre los valores observados y predichos por los modelos, donde el valor más bajo contribuye a la elección de la mejor ecuación. La SSR para este estudio se definió mediante la siguiente expresión:

$$SQR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad \bar{Y}$$

The d index defined by Willmott (1981) is given by:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2}$$

where, $L(x/\theta)$ is the maximum likelihood function, defined as the production of density function, p is the number of model parameters; \hat{Y}_i is the value of the i -th plant height of *Nopalea cochenillifera* after model adjustment; \bar{Y} is the mean of plant height values (Y_i) of *Nopalea cochenillifera*.

Results and Discussion

During the experimental period, the accumulated rainfall was 583.4 mm, where: 16.4 mm in the year 2017; 538.0 mm in 2018 and 29.0 mm in 2019 (see Figure 1). The rainfall presented high variability, which affected the soil water availability for the crops under study. It must be highlighted that the rains predominance with high intensity, as registered from March, April and December 2018 (396.0 mm), represented 67.9 % of the accumulated rain in the evaluated period. This large accumulation of rainfall was possibly higher than the soil water retention capacity, which leads to a decrease in the use of rain by cacti.

$$SQR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

El índice d , definido por Willmott (1981), se calculó como:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2}$$

donde, $L(x/\theta)$ es la función de máxima verosimilitud, definida como la producción de la función de densidad, p es el número de parámetros del modelo; \hat{Y}_i es el valor de la altura i -ésima de la planta de *Nopalea cochenillifera* después del ajuste del modelo; \bar{Y} es la media d los valores de altura de la planta (Y_i) de *Nopalea cochenillifera*.

Resultados y Discusión

Durante el período experimental, la precipitación acumulada fue de 583.4 mm, donde hubo 16.4 mm en el año 2017, 538.0 mm en 2018 y 29.0 mm en 2019 (figura 1). La lluvia presentó una gran variabilidad, que afectó la disponibilidad de agua del suelo para los cultivos en estudio. Cabe destacar que el predominio de lluvias con alta intensidad, como se registraron en marzo, abril y diciembre de 2018 (396.0 mm), representó el 67.9 % de la lluvia acumulada en el período evaluado. Esta gran acumulación de lluvia fue posiblemente mayor que la capacidad de retención de agua del suelo, lo que resulta en una disminución en el uso de lluvia por los cactus.

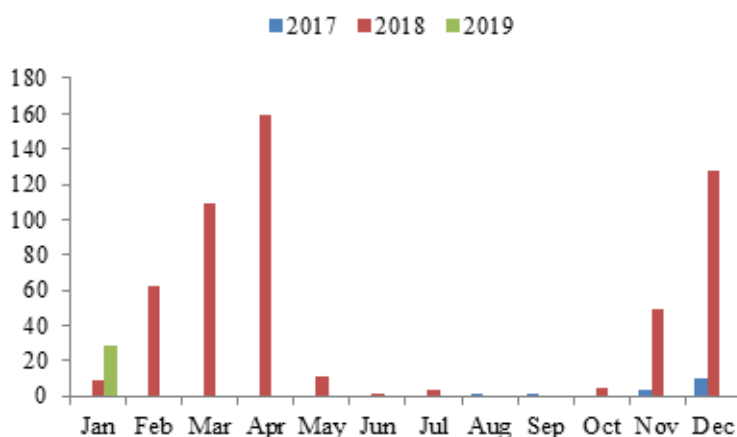


Figure 1. Rainfall in the months of August 2017 to January 2019, in Serra Talhada-PE

The great availability of water in this period allows the plant to growth and, consequently, to produce more dry matter, generating more fodder for the animals. High temporal variability of the rainfall distribution and other climatic factors, in semi-arid areas, have great ecological value, as they can limit the adaptation and growth of species.

Light radiation, soil water content and air temperature are the main environmental factors that affect plant growth and development (Akula and Ravishankar 2011), because the main physiological and biochemical processes depend on these factors.

As presented in table 2, there was no difference in the plant height of *Nopalea cochenillifera* at 510

La gran disponibilidad de agua en este período permite que la planta crezca y, en consecuencia, produzca más materia seca, lo cual genera más forraje para los animales. La alta variabilidad temporal de la distribución de la lluvia y otros factores climáticos, en áreas semiáridas, tienen un gran valor ecológico, ya que pueden limitar la adaptación y el crecimiento de las especies.

La radiación de luz, el contenido de agua del suelo y la temperatura del aire son los principales factores ambientales que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Akula y Ravishankar 2011). Esto es debido a que los principales procesos fisiológicos y bioquímicos dependen de estos factores.

Como se presenta en la tabla 2, no hubo diferencia en la

days after planting (DAP), either with or without the "pornunça" consortium (p-value=0.0675). The same was observed for the cladode total number per plant (p-value=0.1256).

altura de la planta de *Nopalea cochenillifera* a los 510 días posteriores de la siembra (DAPS), con o sin asociación con "pornunça" (valor p = 0.0675). Lo mismo se observó para el número total de cladodios por planta (valor p = 0.1256).

Table 2. Comparison of plant height and cladode total number per plant of *Nopalea cochenillifera* with and without pornunça consortium, at 510 days after planting, in dry conditions, in Serra Talhada - PE, Brazil semi-arid

Variables	Pornunça consortium(Mean±SE)		p-value
	With	Without	
Plant height (cm)	71.78±1.02	80.67±0.61	0.0675
Cladode number (un.)	13.67±0.52	16.33±0.05	0.1256

The consortium with "pornunça" did not affect the growth of *N. cochenillifera* plants, as verified by the similarity of plant height and the total number of cladodes with or without consortium. Therefore, natural competition for light, water and nutrients of these two crops in the evaluated period, and the spacing adopted in consortium did not cause a change in the forage cactus growth pattern, making the cacti-"pornunça" consortium generate greater dry matter production in the same area without the consortium, thus favoring greater production of green material and consequently greater production of forage for animals. Plant height and total number of cladodes per plant are important morphogenic characteristics of forage cactus, because they are highly correlated with phytomass production characteristics (Sales *et al.* 2013).

Species adapted to semi-arid conditions, such as forage cactus (*Nopalea cochenillifera*) and "pornunça" (*Manihot glaziovii* x *Manihot esculenta*), in consortium systems, can elevate the yields and quality of produced phytomass, improving the efficiency in use of production factors such as soil, water, nutrients and radiation (Chimonyo *et al.* 2018), which provides production synergism.

These results indicate that the use of cacti-"pornunça" consortium has agronomic relevance and viability, due to the great use of land, as well as the increase in the final yield of phytomass production. The use of Euphorbiaceae, such as the "pornunça", in this system consorted with cactus, besides favoring this higher performance, also minimizes soil water losses by evaporation and favors a lower air temperature and higher relative humidity, which contributes to a greater stomatal opening and, consequently, to a greater assimilation of CO₂ by plants, which, by its turn, is converted in phytomass after the photosynthesis process.

Silva *et al.* (2015) reported values of clone Little Sweet plant height of 68.11cm, and total number of cladodes as 35.44. When working with clone Little Sweet, Cavalcante *et al.* (2014), in Frei Paulo-SE, verified a mean value of 32.12 cladodes per plant to 898

La asociación con "pornunça" no afectó el crecimiento de las plantas de *N. cochenillifera*, como lo verifica la similitud de la altura de la planta y el número total de cladodios con o sin asociación. Por lo tanto, la competencia natural por la luz, el agua y los nutrientes de estos dos cultivos en el período evaluado, y el espacio adoptado en la asociación no causó un cambio en el patrón de crecimiento del cactus forrajero, haciendo que la asociación cactus-"pornunça" genere mayor producción de materia seca en la misma área sin la asociación, lo que favorece una mayor producción de material verde y, en consecuencia, mayor producción de forraje para los animales. La altura de la planta y el número total de cladodios por planta son características morfogénicas importantes de los cactus forrajeros, ya que están altamente correlacionados con las características de producción de fitomasa (Sales *et al.* 2013).

Las especies adaptadas a condiciones semiáridas, como el cactus forrajero (*Nopalea cochenillifera*) y la "pornunça" (*Manihot glaziovii* x *Manihot esculenta*), en sistemas de asociación, pueden elevar los rendimientos y la calidad de la fitomasa producida, mejorando la eficiencia en el uso de factores de producción como suelo, agua, nutrientes y radiación (Chimonyo *et al.* 2018), que proporciona sinergismo productivo.

Estos resultados indican que el uso de la asociación cactus-"pornunça" tiene relevancia agronómica y viabilidad, debido al gran uso de la tierra, así como al aumento en el rendimiento final de la producción de fitomasa. El uso de Euphorbiaceae, como la "pornunça", en este sistema asociado con cactus, además de favorecer este mayor rendimiento, también minimiza las pérdidas de agua del suelo por evaporación y favorece una temperatura más baja del aire y una humedad relativa más alta, lo que contribuye a una mayor apertura de los estomas y, en consecuencia, a mayor asimilación de CO₂ por las plantas, que, a su vez, se convierte en fitomasa después del proceso de fotosíntesis.

Silva *et al.* (2015) informaron valores de la altura de la planta del clon Little Sweet de 68.11 cm y un número total de cladodios de 35.44. Al trabajar con el clon Little Sweet, Cavalcante *et al.* (2014), en Frei Paulo-SE, encontraron un valor medio de 32.12 cladodios por planta a 898 DAP,

DAP, which is a higher value than the findings of our study, of 510 DAP. In the case of forage cactus, variables such as plant height and total number of cladode per plant may change according to species, plant age, fertilization and spacing levels, as well as environmental factors, such as availability of water in the soil and temperature (Sales *et al.* 2013).

Through the evaluation of plant height growth of *Nopalea cochenillifera* without "pornunça" consortium, it was observed that the hyperbolic tangent, quadratic and Gompertz models presented the best results to estimate plant height in function of the number of days after planting (DAP) and cladode number per plant (table 3). The hyperbolic tangent model presented the highest explanatory power of 98.84 %, the highest Willmott index ($d=0.997$), the smaller sum of squares of residuals ($SSR=17.1$) and Akaike information criterion ($AIC=-15.21$), which makes it the best model to estimate the height of *Nopalea cochenillifera* in this situation.

que es un valor más elevado que los resultados de nuestro estudio, de 510 DAP. En el caso de los cactus forrajeros, variables como la altura de la planta y el número total de cladodios por planta pueden cambiar según la especie, la edad de la planta, los niveles de espaciado y fertilización, así como los factores ambientales, como la disponibilidad de agua en el suelo y la temperatura (Sales *et al.* 2013).

A través de la evaluación del aumento de la altura de la planta de *Nopalea cochenillifera* sin la asociación con "pornunça", se observa que los modelos de tangente hiperbólica, cuadrático y Gompertz presentaron los mejores resultados para estimar la altura de la planta en función del número de días posteriores a la siembra (DAP) y el número de cladodios por planta (tabla 3). El modelo de tangente hiperbólica presentó la potencia explicativa más alta de 98.84%, el mayor índice de Willmott ($d = 0.997$), la suma más baja de cuadrados de residuos ($SSR=17.1$) y el criterio de información de Akaike ($AIC = -15.21$), lo que lo convierte en el mejor modelo para estimar la altura de *Nopalea cochenillifera* en esta situación.

Table 3. Estimates of parameters and criteria of adequacy of models of plant height (H), in function of days after planting (DAP) and cladode number per plant (CN) of *Nopalea cochenillifera* without "pornunça" consortium

Models	Equation of plant height	Criteria of adequacy of model			
		R ² (%)	SSR	AIC	d
Linear multiple	$H=36.21+0.087DAP+1.47CN$	85.81	162.48	64.26	0.970
Power	$H=17.64DAP^{0.2226} CN^{0.109}$	95.21	73.51	28.87	0.987
Gamma	$H=35.37+0.097DAP+1.41CN$	88.56	168.37	64.19	0.970
Logistic	$H=80.67/(1+\exp^{-0.02266DAP+0.044CN})$	94.39	82.65	7.94	0.984
Gompertz	$H=80.67\exp^{-\exp(-0.0217DAP+0.0296CN)}$	98.16	27.09	5.44	0.995
Weibull	$H=\exp^{(3.615+0.001DAP+0.035CN)}$	80.00	299.30	19.4	0.950
Hyperbolic T.	$H=80.67*\tanh(0.038*DAP^{0.88} CN^{-0.202})$	98.84	17.10	-15.21	0.997
Quadratic	$H=31.14+0.34DAP-0.0007DAP^2+0.57CN$	98.66	19.64	45.13	0.997

The increase of plant height of *Nopalea cochenillifera* consorted with "pornunça" is best estimated by the hyperbolic tangent and quadratic models (table 4). The hyperbolic tangent model showed to be the best one to estimate plant height in function of cladode number and number of days after planting. This model presented the best criteria

El aumento de la altura de la planta de *Nopalea cochenillifera* combinada con "pornunça" se estima mejor mediante los modelos tangente hiperbólica y cuadráticos (tabla 4). El modelo tangente hiperbólica demostró ser el mejor para estimar la altura de la planta en función del número de cladodios y el número de días posteriores a la siembra. Este modelo presentó los mejores

Table 4. Estimates of parameters and criteria of adequacy of models of plant height (H), in function of days after planting (DAP) and cladode number per plant (CN) of *Nopalea cochenillifera* with "pornunça" consortium

Models	Equation of plant height	Criteria of adequacy of model			
		R ² (%)	SSR	AIC	d
Linear multiple	$H=33.06+0.082DAP+2.068CN$	90.82	138.80	62.68	0.975
Power	$H=15.96DAP^{0.22}CN^{0.156}$	93.29	101.43	-32.66	0.984
Gamma	$H=31.15+0.091DAP+2.12CN$	90.35	146.06	61.92	0.976
Logistic	$H=80.78/(1+\exp^{-0.0147DAP+0.0061CN})$	94.19	87.86	3.53	0.983
Gompertz	$H=80.78\exp^{-\exp(-0.0136DAP-0.017CN)}$	84.19	239.01	-3.12	0.964
Weibull	$H=\exp^{(3.53+0.0011DAP+0.05CN)}$	78.15	330.25	-20.5	0.949
Hyperbolic T.	$H=80.78*\tanh(0.059*DAP^{0.67}CN^{-0.052})$	99.23	11.70	-22.30	0.998
Quadratic	$H=28.1+0.3DAP-0.0006DAP^2+1.1CN$	98.90	16.57	43.43	0.997

for model adequacy: higher explanatory power ($R^2=99.17\%$), higher Willmott index ($d=0.998$), and smaller sum of squares of residuals ($SSR=12.49$) and Akaike information criterion ($AIC=-23.59$).

Lucena *et al.* (2016) adjusted the growth of cladode length from *Nopalea cochenillifera* using an hyperbolic tangent model with high precision power ($R^2=99.9\%$) and low values of $SSR=0.076$ and $AIC=-23.155$. Lucena *et al.* (2018a) estimated the cladode length of *Nopalea cochenillifera* in function of the cladode fractionation, through the use of a power model with R^2 greater than 99 %, sum of squares of residues less than 2 and Akaike information index lower than -30. Freire *et al.* (2018) adjusted the quadratic model for cladode length from *Nopalea cochenillifera* with low power of explanation ($R^2=54.05\%$) and linear model for cladode number ($R^2=67.03\%$) in function of different salinity levels. Silva *et al.* (2014) adjusted the logistic model to estimate cladode area index from the *Nopalea cochenillifera* in function of the number of days after planting, with precision power of 96.0 %.

After defining the hyperbolic tangent model as the most adequate to explain the plant height of *Nopalea cochenillifera*, with and without the consortium of "pornunça", residuals analysis was performed (figures 2 and 3).

The residuals analysis showed that the hyperbolic tangent models for treatments with and without consortium of "pornunça" are well adjusted, because

criterios para la adecuación del modelo: mayor potencia explicativa ($R^2 = 99.17\%$), mayor índice de Willmott ($d = 0.998$) y menor suma de cuadrados de residuos ($SSR = 12.49$) y criterio de información de Akaike ($AIC = -23.59$)

Lucena *et al.* (2016) ajustaron el crecimiento de la longitud del cladodio de *Nopalea cochenillifera* utilizando un modelo tangente hiperbólico con potencia de alta precisión ($R^2=99.9\%$) y valores menores de $SSR=0.076$ y $AIC=-23.155$. Lucena *et al.* (2018a) estimaron la longitud del cladodio de *Nopalea cochenillifera* en función del fraccionamiento del cladodio, mediante el uso de un modelo de potencia con R^2 mayor que 99 %, suma de cuadrados de residuos menores de 2 e índice de información de Akaike menor que -30. Freire *et al.* (2018) ajustaron el modelo cuadrático para la longitud del cladodio de *Nopalea cochenillifera* con baja potencia de explicación ($R^2=54.05\%$) y el modelo lineal para el número de cladodio ($R^2=67.03\%$) en función de diferentes niveles de salinidad. Silva *et al.* (2014) ajustaron el modelo logístico para estimar el índice de área de cladodios de *Nopalea cochenillifera* en función del número de días posteriores a la siembra, con una potencia de precisión del 96.0 %.

Después de definir al modelo de tangente hiperbólica como el más adecuado para explicar la altura de la planta de *Nopalea cochenillifera*, asociada o no con "pornunça", se realizó el análisis de residuos (figuras 2 y 3).

El análisis de residuos mostró que los modelos de tangente hiperbólica para tratamientos con y sin

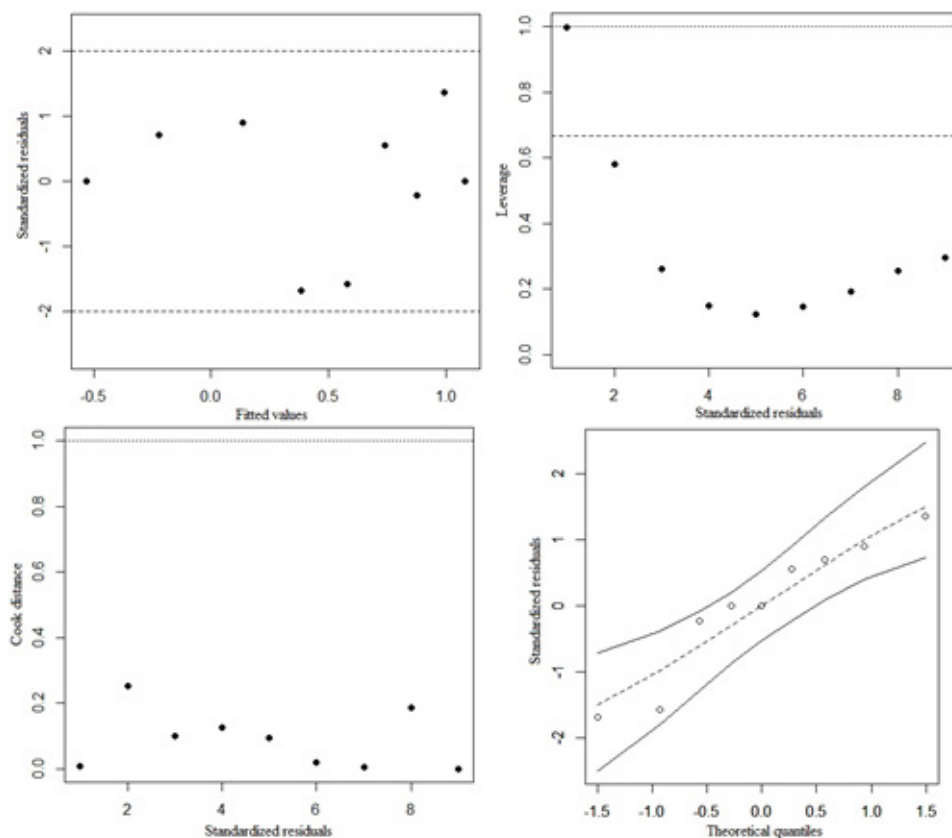


Figure 2. Residuals analyses of hyperbolic tangent fitted model to plant height of *Nopalea cochenillifera* without "pornunça" consortium

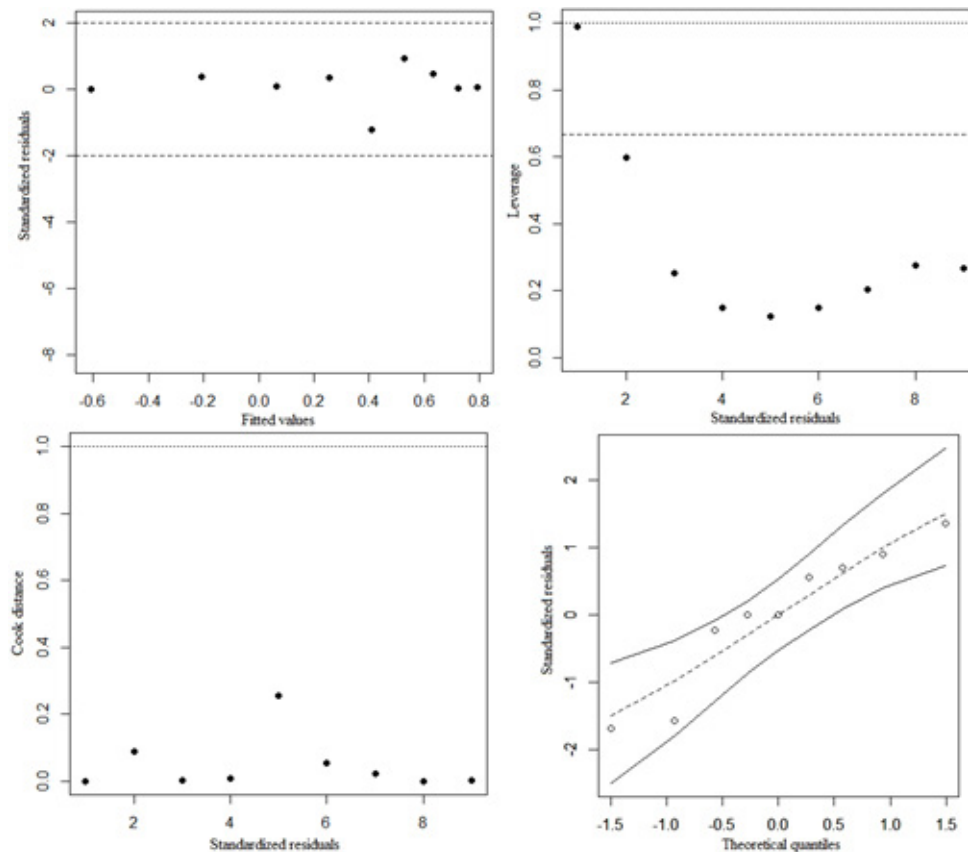


Figure 3. Residuals analyses of hyperbolic tangent fitted model to plant height of *Nopalea cochenillifera* with "pornunça" consortium

there was no point of leverage or influence, and all residuals were within the confidence interval of the normal quantile-quantile graph (figures 2 and 3).

The *Nopalea cochenillifera* consortium with "pornunça" (*Manihot glaziovii* x *Manihot esculenta*) is promising, and it indicates agronomic viability and advantages when consorted. The adoption of the hyperbolic tangent model $H=80.78*\tanh(0.059*DAP^{0.67}CN^{-0.052})$ allows the explanation of the plant height of *Nopalea cochenillifera*, in a non-destructive way, with high precision, speed and low cost, depending on the age of the plant and total number of cladode per plant. The use of mathematical models is an important tool for animal production, since these models accurately estimate dry matter production.

asociación con pornunça están bien ajustados, porque no había punto de influencia, y todos los residuos estaban dentro del intervalo de confianza del gráfico cuantil-cuantil normal (figuras 2 y 3).

La asociación de *Nopalea cochenillifera* con "pornunça" (*Manihot glaziovii* x *Manihot esculenta*) es prometedor e indica viabilidad agronómica y ventajas cuando se combinan. La utilización del modelo de tangente hiperbólica $H = 80.78 * \tanh (0.059 * DAP^{0.67}CN^{-0.052})$ permite la explicación de la altura de la planta de *Nopalea cochenillifera*, de manera no destructiva, con alta precisión, velocidad y bajo costo, dependiendo de la edad de la planta y el número total de cladodios por planta. Los modelos matemáticos son una herramienta importante para la producción animal, ya que estiman con precisión la producción de materia seca.

References

- Akaike, H. 1974. "A new look at the statistical model identification". IEEE Transactions on Automatic Controls, 19(6): 716-723, ISSN: 0018-9286, DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Akula, R. & Ravishankar, G.A. 2011. "Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants". Plant Signaling and Behaviour, 6(11): 1720-1731, ISSN: 1559-2316, DOI: <https://doi.org/10.4161/psb.6.11.17613>
- Cavalcante, L.A.D., Santos, G.R.A., Silva, L.M., Fagundes, J.L. & Silva, M.A. 2014. "Respostas de genótipos de palma forrageira a diferentes densidades de cultivo". Pesquisa Agropecuária Tropical, 44(4): 424-433, ISSN: 1517-6398, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000400010>
- Chimonyo, V. G. P., Modi, A. T. & Mabhaudhi, T. 2018. "Sorghum radiation use efficiency and biomass partitioning in intercrop systems". South African Journal of Botany, 118: 76-84, ISSN: 0254-6299, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.009>
- 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, ISSN: 1678-3921, DOI: <https://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., Santos, D.C., 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, ISSN: 0001-3765, DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820171033>
- 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, ISSN: 0304-3800, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.06.012>
- Inglese, P., Barbera, G. & Mantia, T.L. 1995. "Research strategies for the improvement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production". *Journal of Arid Environments*, 29(4): 455-468, ISSN: 1095-922X, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-1963\(95\)80018-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-1963(95)80018-2)
- Leite, M. L. M. V., Lucena, L. R. R., Sá Jr., E. H. & Cruz, M. G. 2017. "Estimativa da área foliar em *Urochloa mosambicensis* por dimensões lineares". *Revista Agropecuária Técnica*, 38(1): 9-16, ISSN: 2525-8990, DOI: <http://dx.doi.org/10.25066/agrotec.v38i1.32041>
- Leite, M.L.M.V., Lucena, L.R.R., Cruz, M.G., Sá Jr., E.H. & Simões, V.J.L.P. 2019. "Leaf area estimate of *Pennisetum glaucum* by linear dimensions". *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 41: e42808, ISSN: 1807-8672, DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.42808>
- Lucena, L.R.R., Leite, M.L.M.V., Pereira, J.S. & Cavalcante, A.B. 2016. "Ajuste de curvas de crescimento do comprimento do cladódio de *Nopalea cochenillifera*". *Biomatemática*, 26: 39-52, ISSN: 1679-365X
- Lucena, L.R.R., Pereira, J.S. & Leite, M.L.M.V. 2018a. "Avaliação do modelo de regressão potência no crescimento de *Nopalea cochenillifera* em função do fracionamento do cladódio". *Revista Brasileira de Biometria*, 36(3): 578-587, ISSN: 1980-4245, DOI: <http://dx.doi.org/10.28951/rbb.v36i3.238>
- Lucena, L.R.R., Leite, M.L.M.V., Simões, V.J.L.P., Simões, V.J.L.P. & Almeida, M.C.R. 2018b. "Área de cladódio da palma *Opuntia stricta* utilizando dimensões lineares". *Agrarian Academy*, 5(9): 46-55, ISSN: 2357-9951, DOI: http://dx.doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2018a5
- 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, ISSN: 2525-8990, 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 morfológicas e produtivas da palma forrageira". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(12): 939-947, ISSN: 1678-3921, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>
- Sales, A.T., Leite, M.L.V.M., Aalves, A.Q., Ramos, J.P.F. & Nascimento, J.P. 2013. "Crescimento vegetativo de palma forrageira em diferentes densidades de plantio no Curimatú Paraibano". *Tecnologia & Ciência Agropecuária*, 7(1): 19-24, ISSN: 1982-2871
- 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, ISSN: 0961-9534, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.005>
- Silva, T.G.F., Araújo-Primo, J.T., 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, ISSN: 0100-316X
- 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, ISSN: 1981-1160, DOI: <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v9i4a4553>
- 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, ISSN: 0926-6690, 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, ISSN: 1930-0557, DOI: <https://doi.org/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, ISSN: 1460-2431, DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/err106>

Received: December 12, 2019

Accepted: February 28, 2020