



Crecimiento y absorción de nutrimentos del cultivo de pitahaya (*Hylocereus costaricensis* y *H. monocanthus*) de Costa Rica*

Growth and nutrients uptake of dragon fruit (*Hylocereus costaricensis* and *H. monocanthus*) cultivated in Costa Rica

Gabriel Garbanzo-León¹, Jorge Claudio Vargas-Rojas², Edgar Vidal Vega-Villalobos³

* Recepción: 9 de noviembre, 2023. Aceptación: 6 de febrero, 2024. Este trabajo formó parte de los proyectos de investigación B7004 (Análisis de crecimiento de la pitahaya (*Hylocereus* sp.) en un sistema agroforestal con tutores vivos y el uso de riego por goteo en Santa Cruz, Guanacaste) y B6022 (Curvas de absorción de nutrimentos en pitahaya (*Hylocereus* sp.), mediante fertilización química y fertilización orgánica en la finca experimental Santa Cruz, UCR, Guanacaste.) en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica (<https://vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/researchers/603800250>), San José, Costa Rica.

¹ Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, Sabanilla, San José, Costa Rica. juan.garbanzo@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-2848-6199>).

² Universidad de Costa Rica, Sede Regional Guanacaste, Liberia, Costa Rica. jorgeclaudio.vargas@ucr.ac.cr (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0002-1139-2148>).

³ Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Sabanilla, San José, Costa Rica. edgar.vega@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-5678-1710>).

Resumen

Introducción. El cultivo de pitahaya (*Hylocereus costaricensis* y *H. monocanthus*) está en aumento en Costa Rica, pero carece de información técnica para su manejo, como necesidades nutricionales, momentos de fertilización y comportamiento del crecimiento. **Objetivo.** Cuantificar y modelar el crecimiento y la absorción de nutrimentos del cultivo de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monocanthus*) en condiciones del trópico estacional seco de Costa Rica. **Materiales y métodos.** La investigación se realizó durante los años 2017–2020, en Guanacaste, Costa Rica. Se muestrearon plantas a los 76, 165, 308, 450, 607, 903, 1249 y 1706 días después de siembra (DDS) y 205 frutas. Se cuantificó la materia seca y se calculó la absorción de N, P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B. Se ajustaron dos modelos logísticos para determinar la absorción de nutrientes y se calibraron regresiones lineales en fruta fresca. **Resultados.** Para una densidad de siembra de 3000 planta/ha los requerimientos nutricionales del cultivo por hectárea fueron: 137 kg N, 32 kg P, 327 kg K, 63 kg Mg, 32 kg S, 1,60 kg Zn y 0,21 kg B. El modelo logístico de mejor ajuste (RMSE = 0,09) estimó de forma precisa la absorción de N, P, Ca, S, Zn y B. El modelo de regresión lineal tuvo alta capacidad predictora ($R^2 > 0,85$) para los requerimientos de N, P, K, Mg y S en fruta. **Conclusión.** Los modelos logísticos tuvieron alta precisión para modelar de manera determinística la absorción de nutrientes en plantas de pitahaya. Además, se logró cuantificar y modelar de forma eficiente el comportamiento nutricional de las plantas en condiciones de trópico estacional seco de Costa Rica, lo que proporciona información esencial para los programas de fertilización del cultivo.

Palabras clave: manejo de nutrientes, nutrición de las plantas, modelos determinísticos, producción de biomasa.



Abstract

Introduction. The cultivation of dragon fruit (*Hylocereus costaricensis* and *H. monacanthus*) is increasing in Costa Rica, but technical information for its management, such as nutritional requirements, fertilization timing, and growth behavior, is lacking. **Objective.** To quantify and model the growth and nutrient uptake of dragon fruit (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) under dry tropics conditions in Costa Rica. **Materials and methods.** The research was conducted from 2017 to 2020 in Guanacaste, Costa Rica. Plants were sampled at 76, 165, 308, 450, 607, 903, 1249, and 1706 days after planting (DAP) and 205 fruits were analyzed. Dry matter was quantified, and the uptake of N, P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn, and B was calculated. Two logistic models were fitted to determine nutrient uptake, and linear regressions were calibrated for fresh fruit. **Results.** For a planting density of 3000 plants/ha, the nutritional requirements per hectare were: 137 kg N, 32 kg P, 327 kg K, 63 kg Mg, 32 kg S, 1.60 kg Zn, and 0.21 kg B. The best-fitting logistic model (RMSE = 0.09) accurately estimated the uptake of N, P, Ca, S, Zn, and B. The linear regression model demonstrated high predictive capacity ($R^2 > 0.85$) for the nutrient requirements of N, P, K, Mg, and S in the fruit. **Conclusion.** Logistic models provided high precision in deterministically modeling nutrient uptake in dragon fruit plants. The study affectively quantified and modeled the nutritional behavior of the plants under Costa Rica's dry tropical conditions, providing essential information for optimizing fertilization programs for the crop.

Keywords: nutrient management, plant nutrition, deterministic models, biomass production.

Introducción

El cultivo de pitahaya (*Hylocereus* spp) es una actividad creciente en Costa Rica. No obstante, su uso no está muy difundido y la producción nacional no logra satisfacer la demanda del mercado local (Esquivel & Araya, 2012; García Barquero & Quirós Madrigal, 2010; Le Bellec et al., 2006; Mizrahi, 2014). Las especies *H. costaricensis* y *H. monacanthus* son las más utilizadas en el Pacífico Norte del país y se han identificado por presentar pulpa roja (Campos Granados, 2022; Garbanzo-León et al., 2019; Garbanzo-León et al., 2021). Existen varios genotipos dentro de estas especies y fueron identificadas por los agricultores con nombres vernáculos según las características fenotípicas en las frutas y cladodios, entre estos genotipos se encuentran: “Lisa”, “Nacional”, “Orejona”, “Rosa”, “San Ignacio” y “Cebra” (Campos Granados, 2022; Esquivel & Araya Quesada, 2012; Esquivel et al., 2007; Retana Sánchez et al., 2018; Viñas et al., 2012). Los pequeños productores de Costa Rica consideran el cultivo como una opción potencial para su desarrollo en fincas, donde se presenta limitación del recurso hídrico. Guanacaste por su clima es una zona donde el cultivo puede tener un desarrollo idóneo y puede brindar un ingreso económico a familias dedicadas a la agricultura. La información técnica para el desarrollo de este cultivo es escasa a nivel nacional. Solo algunas investigaciones preliminares fueron realizadas en el desarrollo de la planta con densidades de siembra, observaciones de crecimiento, caracterización fisicoquímica de la fruta, germinación de semillas y su desarrollo de propagación *in vitro* (Campos Granados, 2022; Hernández-Ramos et al., 2020; Le Bellec et al., 2006; de Castro Lima et al., 2019; Luu et al., 2021; Mizrahi, 2014; Moreira et al., 2016; Nofriandi et al., 2021; Zepa-Catanho et al., 2019). No obstante, la información técnica para el manejo eficiente de la fertilización en el cultivo se basa solo en algunas pruebas en campo (López-Turcios & Guido-Miranda, 1998), sin cuantificar los requerimientos nutricionales del cultivo.

La planta de pitahaya es una cactácea suculenta, epífita o hemiepífita (Mizrahi, 2014), muestra cladodios que se les puede encontrar en distintos tamaños, grosor y aristas y se utilizan para el desarrollo de nuevas plantaciones (Garbanzo-León et al., 2021; Hernández-Ramos et al., 2020; Le Bellec et al., 2006; Ortiz-Hernández & Carrillo-

Salazar, 2012). Esta estructura cumple la función de tallo-hoja, debido a que tienen la capacidad de fotosintetizar y a la vez sirve de sostén de la planta (Nofriandi et al., 2021; Ortiz-Hernández & Carrillo-Salazar, 2012). De los cladodios emergen numerosas raíces adventicias que permiten el crecimiento de la planta sobre árboles, piedras y ambientes sombreados en bosques tropicales de América (Lucena Cavalcante et al., 2011; Mizrahi, 2014; Nofriandi et al., 2021; Rodríguez & Leihner, 2006).

La fertilización en plantaciones de pitahaya en el Pacífico Seco de Costa Rica se ha basado en las experiencias de otros países, como Nicaragua, Guatemala y Colombia. En general, estos países presentan sistemas ecológicos diferentes a los de la zona de producción costarricense (Lucena Cavalcante et al., 2011). Se ha comprobado que el uso de dosis de 80 kg ha⁻¹ de N, 20 kg de P₂O₅ ha⁻¹, 10 kg de K, Cu, Zn ha⁻¹ y 5 kg de B y Mn produjeron un aumento en la cantidad de frutas totales por planta y en el rendimiento total en tres cosechas consecutivas (López-Turcios & Guido-Miranda, 1998).

Otros estudios en pitahaya “Orejona” en Guanacaste, reportaron que la aplicación de 100 g por planta de formula completa granulada (N, P y K), permitió la perdurabilidad del cultivo por veinte años (Vega Villalobos & Musmanni Quintana, 2005). La planta tiene capacidad en su sistema radical de absorber nutrimentos del suelo y compuestos en activa descomposición por su adaptabilidad con las raíces adventicias (Le Bellec et al., 2006; Vega & Musmanni, 2005). Empero, la información sobre estudios de manejo técnico, curvas de crecimiento y curvas de absorción de este cultivo, solo presenta algunas aproximaciones para variedades distintas a las cultivadas en Costa Rica, en comparación con las aproximaciones en los ajustes de fertilización en América (Amato Moreira et al., 2016; Corres Antonio, 2006; de Castro Lima et al., 2019; de Castro Lima et al., 2021; Lucena Cavalcante et al., 2011; Morales-Ayala et al., 2020; Nofriandi et al., 2021; Orrico Zalazar, 2013).

El análisis de crecimiento en asocio con el comportamiento en la absorción de los nutrimentos es una de las herramientas más utilizadas para el diseño de los planes de fertilización en los cultivos. Esta herramienta puede medir el comportamiento potencial de absorción de nutrimentos según diferentes momentos en el crecimiento de la planta. Además, permite estimar el potencial de desarrollo genético (factores internos) y comportamiento con el agroecosistema donde se desarrolla (factores externos) (Bertsch, 2009). Una de las ventajas que proveen las curvas de absorción es que permiten determinar el momento óptimo de aplicación de fertilizantes y cuantificar los requisitos nutricionales que requiere una planta o cultivo (Johnston & Bruulsema, 2014).

Las curvas de crecimiento y absorción tienen como base y factor común la biomasa seca. Su relación funcional con los días después de siembra (DDS) sigue un patrón sigmoidal característico, con un patrón típico en forma de “S” (Lipovetsky, 2010). Este tipo de crecimiento es común en cultivos anuales, aunque en cultivos perennes se ve influenciado por diversos factores externos, como la humedad del suelo, salinidad, temperatura o el sistema de producción en sí (Sepaskhah et al., 2011; Shabani et al., 2014). La representación matemática de las formas sigmoidales se encuentra dentro de los modelos logísticos. Estos se pueden utilizar para la simulación del crecimiento de plantas y poseen factores predefinidos (modelos determinísticos) utilizados cuando existe limitada información (de Castro Lima et al., 2019; Kawano et al., 2020; Lipovetsky, 2010; Sepaskhah et al., 2011; Soltani & Sinclair, 2012).

El uso de regresiones logísticas está documentado para modelar y analizar el crecimiento de los cultivos. Entre algunas aproximaciones simuladas se encuentran: altura de planta, materia seca, crecimiento de hojas y frutas, acumulación de calcio en frutos, número de tubos del floema, germinación acumulativa de esporas, número acumulativo de inflorescencias y germinación acumulativa de semillas (Auzanneau et al., 2011; Feller et al., 2015; Gabriel y Galán et al., 2015; Gajanayake et al., 2015; Génard & Huguet, 1996; Gur et al., 2010; Lim et al., 2015; Montanaro et al., 2006; Moustakas et al., 2011; Sepaskhah et al., 2011; Shabani et al., 2014; Tarara et al., 2009; Xiangxiang et al., 2014).

A pesar de la aplicabilidad de los modelos logísticos para estudiar el crecimiento de las plantas y la importancia que tiene la pitahaya como actividad agrícola emergente, existe poca información sobre las épocas de aplicación, las cantidades y el modelo de crecimiento específico de este cultivo. Esta información sería de gran ayuda para

los productores, ya que les permitiría optimizar su rendimiento. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue cuantificar y modelar el crecimiento y la absorción de nutrientes del cultivo de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) en las condiciones del trópico estacional seco de Costa Rica.

Materiales y métodos

La investigación se realizó durante el periodo de 2017 – 2020, en cinco sitios productores de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) ubicadas en los cantones de Liberia y Santa Cruz, provincia de Guanacaste, Costa Rica. Estas fincas tenían plantaciones de pitahaya, las cuales fueron utilizadas para el desarrollo del modelo de crecimiento y absorción de nutrimentos del cultivo. Para la cuantificación nutricional se obtuvieron frutas de sitios de producción de pitahaya en Liberia, Santa Cruz, Bagaces, Jicaral y Lepanto.

El suelo donde se ubicaron las unidades de manejo agronómicas utilizadas para el análisis de crecimiento de pitahaya mostraron suficiencia nutricional, según el nivel crítico desarrollado para la solución extractora KCl-Olsen modificado (Cuadro 1). Según las caracterizaciones previas de los sitios, se determinó que la concentración de bases se encontró en suficiencia, los suelos de Liberia (S1L, S2L) no mostraron problemas de acidez intercambiable (Cuadro 1), mientras que los suelos de Finca Experimental de Santa Cruz (FESC) de la Universidad de Costa Rica mostraron acidez causada por fertilización nitrogenada. Los suelos de Liberia manifestaron deficiencias de P y Zn. La textura encontrada en estos suelos fue: franco arenoso para la zona de Liberia y arcillosa para los suelos de Santa Cruz. Las plantas no mostraron déficit hídrico durante la época seca, debido a que las unidades agronómicas contaron con irrigación.

Cuadro 1. Concentración de nutrimentos en el suelo en cinco unidades de producción de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) ubicadas en los cantones de Liberia y Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica durante el periodo 2017-2020.

Table 1. Nutrient concentration in soil across five dragon fruit (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, during the period 2017-2020.

KCl Olsen ⁺	pH H ₂ O	cmol(+) L ⁻¹					% SA	mg L ⁻¹				
		acidez	Ca	Mg	K	CICE		P	Zn	Cu	Fe	Mn
NC	5,50	0,5	4	1	0,20	5		10	3	1	10	5
S1L	5,90	0,19	8,00	1,65	0,59	10,43	2	3	0,60	4	80	7
S2L	5,30	0,22	9,88	2,09	1,00	13,19	2	149	135,40	7	186	54
FESC	5,20	0,95	8,68	1,63	0,43	11,69	8	78	3,30	5	143	31

S1L: sitio 1 Curubandé, Liberia, Guanacaste. Textura de suelo Franco Arenosa. S2L: sitio 2 El salto, Liberia, Guanacaste. Textura de suelo Franco Arenosa. FESC: Finca Experimental de Santa Cruz. Textura de suelo Arcillosa. + Solución extractora KCL-Olsen modificado, Laboratorio de Suelos y Foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica. NC: nivel crítico según Cabalceta & Molina (2006). / S1L: Site 1 Curubandé, Liberia, Guanacaste. Soil texture Loamy Sand. S2L: Site 2 El Salto, Liberia, Guanacaste. Soil texture Loamy Sand. FESC: Experimental Farm of Santa Cruz, soil texture Clayey. Extractant solution KCL-Olsen modified, Soil and Foliar Laboratory, Agricultural Research Center, Universidad de Costa Rica. NC: Critical level according to Cabalceta & Molina (2006).

Tasa de crecimiento, índice de área foliar y absorción de nutrimentos

Se seleccionaron plantas en cada unidad de manejo de las regiones en estudio. Como criterio de selección se establecieron plantas sin síntomas de problemas nutricionales, sin problemas de crecimiento visibles; en general,

plantas que no presentaran problemas fitosanitarios. Estas plantas no se identificaron a nivel de especie en estados iniciales de crecimiento (1 - 3 años) mediante técnicas genéticas, no obstante, en los sitios evaluados se encontraron las dos especies (por las características en las frutas) presentes en Costa Rica (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*). Además, las plantas seleccionadas debían contar con historial de manejo, de manera que fue posible cuantificar los días de crecimiento de la planta después de su siembra. Así, se muestrearon plantas a los 76, 165, 308, 450, 607, 903, 1249 y 1706 días después de siembra (DDS) en cada sitio.

Cada planta seleccionada fue separada en muestras categorizadas por tallo basal (TB), tallo primario (TP), tallos secundarios (TS), tallos terciarios (TT), tallo cuaternario (TC) y raíces (RA). Las raíces a su vez fueron separadas en raíces primarias y adventicias. Cada muestra fue procesada en la Finca Experimental de Santa Cruz, para obtener el peso fresco y seco de las partes. Luego fueron enviadas al Laboratorio de Suelos y Foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, donde se cuantificó la concentración (%) de N, P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B, también se determinó la totalidad de materia seca para el desarrollo del análisis de crecimiento de las plantas y la calibración del modelo de crecimiento de cultivo.

Con los datos obtenidos de los análisis de laboratorio, se calculó la tasa de crecimiento del cultivo (TCC, g/m²/día) con base en la técnica expuesta por Rodríguez y Leihner (2006). Además, se determinó el área foliar con la metodología desarrollada para la pitahaya en Costa Rica (Garbanzo-León et al., 2019). Se calculó el índice de área foliar, donde se consideró la densidad de siembra utilizada en el cultivo (3000 plantas/ha), según la metodología de análisis de crecimiento de las plantas propuesta por Hunt (1979). Se estimó la absorción de nutrientes para cada momento de evaluación en las plantas y para 205 frutos, se utilizó la materia seca acumulada en el tiempo y los contenidos nutricionales de cada sección de la planta y el fruto (cáscara y pulpa), según la sistemática propuesta por Bertsch (2009).

Modelado de crecimiento y absorción de la pitahaya

Para el ajuste del modelo de crecimiento del cultivo y absorción de nutrientes se usó un modelo logístico basado en parámetros fotosintéticos (Kawano et al., 2020) y un modelo logístico de crecimiento (Hau, 1993; Lipovetsky, 2010; Shabani et al., 2018). Ambos modelos permitieron la predicción de la biomasa y absorción de nutrientes en el tiempo t (medido en este trabajo como DDS).

El modelo basado en parámetros fotosintéticos se define en la ecuación 1. Donde M es la biomasa de la planta; M_{max} es la biomasa que el cultivo puede alcanzar en un ambiente dado; M_0 es la biomasa mínima de las plantas en el campo; φ es un parámetro de ajuste fotosintético de la planta (que se define en la ecuación 2); y ε es el parámetro de eficiencia de asimilación fotosintética.

$$M = \frac{M_{max}}{1 + \left(\frac{M_{max}}{M_0} - 1 \right) e^{-\varphi \varepsilon t}} \quad \text{ecuación 1}$$

$$\varphi = \frac{\gamma(J,T) - \rho(J,T)}{P_{max}^*} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde γ es la tasa bruta fotosintética que se encuentra en función de la intensidad de luz (J) y la temperatura (T); ρ es la suma respiración basal y la respiración inducida por la luz, que también está en función de J y T ; y P_{max}^* es la representación empírica de la velocidad fotosintética máxima registrada a una temperatura dada, en el cual la planta de interés crece de manera natural u óptima.

El modelo basado en parámetros de crecimiento de plantas se especifica en la ecuación 3.

$$Y = Y_{ini} + \frac{Y_{max} - Y_{ini}}{1 + \exp(-\alpha x + b)} \quad \text{ecuación 3}$$

Donde Y es la biomasa de la planta; Y_{max} es la biomasa máxima acumulada por la planta; Y_{ini} es la biomasa inicial acumulada por la planta; x es el tiempo en DDS; α es la tasa de crecimiento (o absorción); y b es el punto medio de la curva sigmoide ($x = b/\alpha$) son coeficientes constantes.

Los valores M_{max} , M_0 , Y_{max} y Y_{ini} se sustituyeron por observaciones de biomasa de pitahaya (g) y absorción de nutrientes (kg y g), y los parámetros de ajuste al modelo ($-\alpha x + b$) fueron determinados mediante soluciones numéricas. La estimación de los parámetros de cada modelo se ajustó con la metodología de mínimos cuadrados. Además, la capacidad predictora de ambos modelos se validó con la raíz del error cuadrático promedio (RMSE) y el R^2 (Qiu et al., 2015).

Peso de frutos y absorción de nutrientes

La absorción nutricional de frutas fue analizada de manera independiente al crecimiento de la planta. Se ajustó un modelo de regresión lineal (ecuación 4) para obtener la proyección en la absorción de nutrientes por cada kg de fruta fresca producida en el cultivo de la pitahaya. Todos los procedimientos se realizaron con el lenguaje de programación RStudio (R Core Team, 2022).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i \quad \text{ecuación 4}$$

Donde:

y_i : es requerimiento de nutrientes observado para el i -ésimo nivel de x (kg de fruta fresca).

β_0 : parámetro que representa el intercepto.

β_1 : parámetro que representa la pendiente.

x_i : i -ésimo valor de la variable independiente (kg fruta fresca).

e_i : representa el error residual. Se supone que se distribuye normal e independiente con esperanza 0 y varianza $\sigma^2 \forall x_i$.

Resultados

Tasa de crecimiento e índice de área foliar

El mayor desarrollo de las plantas de pitahaya se encontró entre los 600 y 1250 días después de la siembra (DDS) (Figura 1). El índice de área foliar (IAF) mostró un incremento de 0,20 a los 450 DDS hasta los 1250 DDS con un 0,60, luego presentó un decrecimiento del IAF. Este comportamiento se encontró al analizar la tasa de crecimiento de cultivo (TCC), al mostrar el mismo comportamiento a los 450 DDS con 0,10 g/m²/día y 0,70 g/m²/día a los 1250 DDS.

El mayor incremento en la biomasa seca en el cultivo de pitahaya se encontró entre los 900 y 1250 DDS, con un 31 % y 36 % de total acumulado, respectivamente (Figura 2). El incremento al inicio (0-500 DDS) y al final (1500-2000 DDS), fueron inferiores al 15 %.

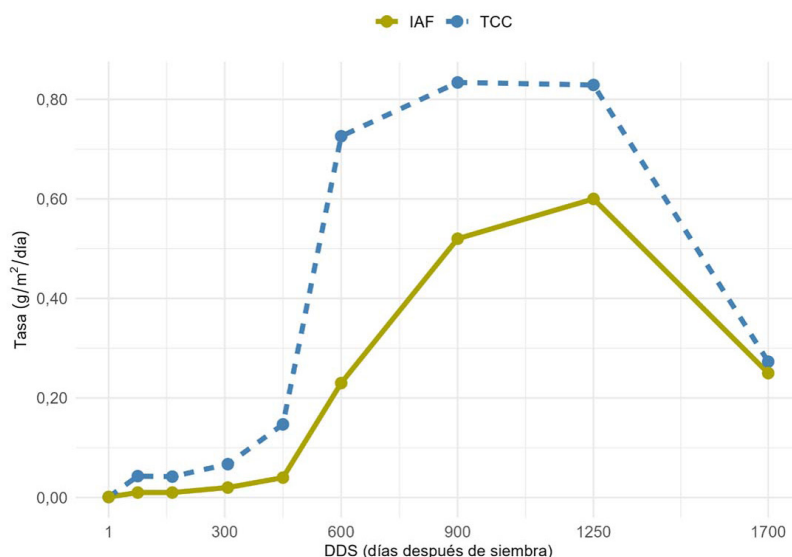


Figura 1. Índice de área foliar (IAF) y tasa de crecimiento del cultivo (TCC - g/m²/día) evaluados en cinco unidades de producción de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) ubicadas en los cantones de Liberia y Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica durante el periodo 2017-2020.

Figure 1. Leaf area index (IAF) and crop growth rate (TCC - g/m²/day) evaluated in in five dragon fruit (*Hylocereus costaricensis* and *H. monacanthus*) production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, during the period 2017-2020.

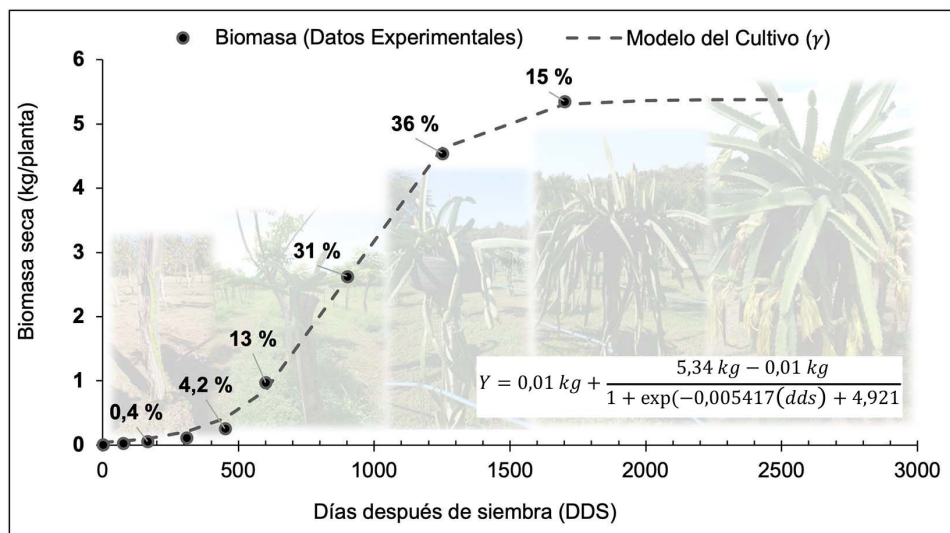


Figura 2. Valores observados de biomasa y valores predichos por el modelo logístico basado en la absorción de nutrientes para el cultivo pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) en cinco unidades de producción ubicados en los cantones de Liberia y Santa Cruz Guanacaste, Costa Rica durante el periodo 2017-2020.

Figure 2. Observed biomass values and values predicted by the logistic model based on nutrient uptake for dragon fruit cultivation (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) in five production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, during the period 2017-2020.

Absorción de nutrimentos de la planta

El análisis químico de nutrimentos en las diferentes estructuras de las plantas de pitahaya en el tiempo mostró que el N tiene una tendencia a una concentración más alta ($> 1,2\%$) en etapas tempranas del crecimiento (76 – 450 DDS) de los cladodios y la flor. Este mismo efecto se encontró para Ca y K, sin embargo, estos dos elementos se encontraron más concentrados en la flor y las cáscaras de los frutos. No obstante, el K tuvo una tendencia de concentrarse en los tallos más recientes, es decir, en los últimos tallos emitidos por la planta (Cuadro 2). La concentración de nutrimentos mostró una tendencia de mayor contenido de N, K y Ca en flor y cáscara (Cuadro 3).

La absorción máxima alcanzada por las plantas de pitahaya se encontró entre los 1270 y 1700 DDS (Cuadro 4). La absorción calculada para 3000 plantas/ha de N, P, K, Mg, Ca y S fue de 137, 30, 32,10, 327,70, 63,50, 455,90, 32,00 kg ha⁻¹ y 1641,10, 2165 g ha⁻¹ para Zn y B, respectivamente. Los incrementos máximos de absorción alcanzada para cada nutrimento (10,20 % – 62,60 %) se encontraron entre los 900 y 1250 DDS (2,5 y 3,4 años). También se encontró que el orden de absorción de nutrimentos fue Ca > K > N > P > S > Fe > Zn > B > Mn > Cu.

Modelo de mejor ajuste para el crecimiento y absorción de nutrientes en pitahaya

Los parámetros estimados, el RMSE, el R² y el coeficiente de correlación (*rho*) entre los valores observados y los valores predichos para cada modelo se presentan en el Cuadro 5. Al comparar el RMSE y el R², se observó que el modelo basado en parámetros fotosintéticos tenía un RMSE mayor para los nutrientes N, P, Ca, S, Zn y B en comparación con el modelo basado en la absorción de nutrientes. Sin embargo, el R² de ambos modelos fue superior al 92 %, con la excepción de P, que mostró un R² del 75 % y 77 % para los modelos correspondientes. En general, el modelo basado en la absorción de nutrientes mostró el mejor ajuste, por lo que los resultados presentados en la Figura 2 corresponden a las estimaciones obtenidas mediante este modelo.

Concentración y absorción de nutrimentos en frutas

El modelo de regresión lineal fue significativo para modelar la relación funcional entre la absorción de nutrimentos y el tamaño de frutos (Cuadro 6). El modelo de predicción obtuvo un R² de 0,85 para los macronutrientes en frutas, a excepción de Ca que mostró un R² de 0,60. En el caso de los micronutrientes el ajuste fue inferior al 75 %. La proyección de fruta computado de las ecuaciones lineales (a partir de 500 kg hasta 10 000 kg de fruta fresca) predice (R² = 0,85) los requerimientos nutricionales de N, P, K, Mg y S, para una producción potencial de los sitios de productores de la pitahaya en Costa Rica.

Cuadro 2. Concentración de nutrimentos en secciones de plantas de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) en diferentes días después de trasplante en cinco unidades de producción ubicados en los cantones de Liberia y Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, durante el periodo 2017-2020.

Table 2. Nutrient concentration in sections of dragon fruit plants (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) at different days after transplanting in five production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, during the period 2017-2020.

DDS	Sección	PF	PS	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
		----- g -----		----- % -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
1	TB	120,40	9,80	0,79	0,29	2,23	1,58	2,93	0,13	267	9	36	189	21
	Raíz	7,70	1,90	0,75	0,06	0,65	0,35	0,56	0,05	5361	26	19	114	11
76	TB	346,40	31,30	1,50	0,34	2,67	1,35	2,51	0,14	213	7	39	147	107
	Raíz	6,30	1,80	1,00	0,07	0,38	0,31	0,72	0,06	2089	11	15	61	14
165	TB	444,70	55,80	0,80	0,36	2,18	0,96	1,63	0,11	961	8	77	128	58
	Raíz	10,10	2,00	1,20	0,12	0,39	0,31	1,22	0,07	1484	9	42	68	13
308	TB	861,60	108,80	0,82	0,28	1,73	0,88	2,62	0,13	701	5	424	230	95
	Raíz	50,90	12,20	1,30	0,16	0,47	0,33	1,11	0,08	15283	35	825	340	48
450	TB	1937,10	234,60	0,82	0,28	1,73	0,88	2,62	0,13	701	5	424	230	95
	Raíz	97,40	24,30	1,30	0,16	0,47	0,33	1,11	0,08	15283	35	825	340	48
600	TB	978,00	177,40	0,85	0,12	1,15	0,37	2,13	0,11	79	4	17	63	7
	TP	3449,30	520,20	0,68	0,24	1,47	0,42	2,53	0,16	58	6	21	93	9
	TS	1881,50	173,30	0,48	0,29	1,81	0,63	4,44	0,24	115	7	32	157	17
	Raíz	225,20	64,90	0,78	0,05	0,40	0,10	0,73	0,06	416	3	8	21	5
	RA	91,50	41,40	0,71	0,05	0,37	0,08	1,11	0,06	585	40	34	34	8
	TB	2203,60	316,30	0,70	0,27	2,15	0,47	2,12	0,20	82	5	20	81	10
900	TP	5998,20	954,50	0,80	0,16	1,63	0,43	2,10	0,19	48	6	17	125	10
	TS	4028,60	666,40	0,72	0,11	1,62	0,40	2,20	0,14	42	3	19	203	9
	TT	3488,40	429,60	0,90	0,17	2,14	0,60	3,25	0,24	129	6	31	526	13
	Raíz	781,90	247,00	0,79	0,06	0,66	0,11	0,75	0,08	389	3	10	28	6
	RA	31,30	14,60	0,73	0,09	0,41	0,15	1,37	0,06	286	21	80	64	7
1250	TB	3330,50	261,90	1,18	0,20	1,51	0,32	2,18	0,11	193	9	55	54	10
	TP	14137,40	892,20	0,94	0,24	2,10	0,44	2,07	0,11	106	10	90	103	12
	TS	28889,30	1485,20	0,88	0,33	2,48	0,47	2,47	0,14	68	9	142	208	19
	TT	21591,40	1156,20	0,74	0,20	3,24	0,60	2,94	0,13	94	6	147	302	17
	TC	6873,00	352,70	0,80	0,17	2,98	0,62	3,14	0,11	67	6	127	324	15
	Raíz	1546,50	309,20	0,84	0,07	0,58	0,11	0,72	0,09	1442	10	76	64	8
	RA	282,60	85,50	0,86	0,08	1,10	0,07	1,34	0,09	859	34	58	44	8
1700	TB	3559,00	369,40	0,85	0,06	2,82	0,36	0,90	0,16	206	10	12	53	9
	TP	11746,00	916,70	0,77	0,08	2,73	0,29	1,40	0,18	60	11	13	199	17
	TS	34749,00	2125,40	0,81	0,10	3,19	0,41	1,80	0,23	76	12	17	200	14
	TT	18764,00	1021,70	0,90	0,10	2,98	0,53	1,82	0,22	37	8	20	270	13
	TC	12077,00	568,20	1,03	0,13	2,80	0,51	2,32	0,18	60	5	20	283	12
	Raíz	1613,00	259,00	0,94	0,04	0,70	0,06	0,51	0,08	527	12	9	19	6
	RA	484,00	93,30	0,97	0,05	0,75	0,06	0,81	0,07	710	85	33	33	7

PF: peso fresco, PS: peso seco, TB: tallo basal, TP: tallo primario, TS: tallo secundario, TT: tallo terciario, TC: tallo cuaternario, RA: raíz adventicia. // PF: fresh weight, PS: dry weight, TB: basal stem, TP: primary stem, TS: secondary stem, TT: tertiary stem, TC: quaternary stem. RA: adventitious root. RAÍZ: roots.

Cuadro 3. Concentración de nutrimentos en flor, cáscara y fruta de plantas de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) en cinco unidades de producción ubicados en los cantones de Liberia y Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica durante el periodo 2017-2020.

Table 3. Nutrient concentration in flowers, peel, and fruit of dragon fruit plants (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) in five production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, during the period 2017-2020.

	PF	PS	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Sección	----- g -----		----- % -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
Flor	-	-	4,52	0,62	0,47	0,44	5,55	0,32	46	16	73	171	18
Cáscara	103,20	8,20	1,16	0,25	1,38	0,66	6,04	0,12	76	14	95	296	49
Pulpa	177,00	25,60	1,48	0,24	0,07	0,27	1,85	0,12	39	8	29	24	13

Cuadro 4. Absorción de nutrimentos e incrementos de absorción en plantas de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) en diferentes días después de trasplante en cinco unidades de producción ubicados en los cantones de Liberia y Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, durante el periodo 2017-2020.

Table 4. Nutrient uptake and uptake increases in dragon fruit plants (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) at different days after transplanting in five production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, during the period 2017-2020.

3000 p ha ⁻¹		PS	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Años	DDS	g/planta	kg ha ⁻¹						g ha ⁻¹				
0,0	1	11,70	0,30	0,10	0,70	0,50	0,90	0,0	37,6	0,4	1,2	6,2	0,7
0,2	76	33,10	1,50	0,30	2,50	1,30	2,40	0,1	31,4	0,7	3,7	14,1	10,1
0,5	165	57,70	1,40	0,60	3,70	1,60	2,80	0,2	169,5	1,4	13,1	21,8	9,8
0,8	308	120,90	3,20	1,00	5,80	3,00	9,00	0,5	786,9	2,9	168,5	87,5	32,7
1,2	450	258,90	6,70	2,10	12,50	6,40	19,20	1,0	1609,2	6,1	358,6	186,7	70,4
1,6	600	977,20	20,00	6,10	39,70	12,10	76,70	4,5	346,0	20,7	570,0	268,6	28,6
2,5	900	2628,40	61,60	12,00	132,10	33,40	172,30	13,8	766,3	38,8	900,0	1542,1	77,6
3,4	1250	4542,70	117,60	32,10	330,30	63,50	327,70	22,7	2687,7	115,5	1641,1	2701,4	206,7
4,7	1700	5353,60	137,30	15,00	455,90	63,40	264,70	32,0	1701,6	177,9	264,3	3212,3	211,5
Incrementos de absorción (%)													
0,0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	76	0,4	0,9	0,7	0,4	1,3	0,5	0,3	0,0	0,2	0,2	0,2	4,5
0,5	165	0,5	0,0	0,9	0,3	0,5	0,1	0,2	5,1	0,4	0,6	0,2	0,0
0,8	308	1,2	1,3	1,1	0,5	2,2	1,9	0,8	13,0	0,9	9,5	2,0	10,9
1,2	450	2,6	2,6	3,6	1,5	5,4	3,3	1,6	20,4	1,8	11,6	3,1	17,8
1,6	600	13,4	9,8	12,3	6,0	8,9	17,5	11,1	0,0	8,2	12,9	2,6	0,0
2,5	900	30,8	30,3	18,6	20,3	33,5	29,2	29,1	24,7	10,2	20,1	39,6	23,2
3,4	1250	35,8	40,8	62,6	43,5	47,5	47,4	27,5	36,7	43,1	45,2	36,2	41,0
4,7	1700	15,1	14,3	0,0	27,5	0,0	0,0	29,3	0,0	35,2	0,0	15,9	2,6

Densidad de siembra: 3000 plantas/ha. PS: peso seco, DDS: días después de siembra. / Plant density: 3000 plants/ha. PS: dry weight, DDS: days after planting.

Cuadro 5. Parámetros estimados, capacidad predictora y coeficiente de correlación entre los valores predichos y los valores observados para los modelos ajustados, en el cultivo de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) en cinco unidades de producción ubicados en los cantones de Liberia y Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, durante el 2017-2020.

Table 5. Estimated parameters, predictive capacity, and correlation coefficient between predicted and observed values for the fitted models in dragon fruit cultivation (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) in five production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, during the period 2017-2020.

Modelo basado en parámetros fotosintéticos								
Nutrimento ⁺	M	M ₀	M _{max}	φ	ε	RMSE	R ²	rho
PS	g/planta	0,01	5,35	0,0449	0,1498	0,17	0,99	0,99
N		0,30	137,30	0,0443	0,1478	2,60	0,99	0,99
P	kg ha ⁻¹	0,10	32,10	0,0429	0,1431	5,90	0,77	0,88
Ca		0,70	455,90	0,0427	0,1422	8,10	0,99	0,99
Mg		0,50	63,50	0,0413	0,1377	2,20	0,99	0,99
K		0,90	327,70	0,0454	0,1514	24,40	0,97	0,98
S	g ha ⁻¹	0,01	32,00	0,0576	0,1919	3,08	0,95	0,98
Zn		1,20	1641,10	0,0335	0,2582	187,60	0,92	0,96
B		0,70	238,40	0,0466	0,1270	24,60	0,94	0,97
Modelo basado en la absorción de nutrientes								
Nutrimento ⁺	Y	Y _{ini}	Y _{max}	a	b	RMSE	R ²	rho
PS	g/planta	0,01	5,35	0,0054	4,92	0,09	0,99	0,99
N		0,30	137,30	0,0057	5,30	1,20	0,99	0,99
P	kg ha ⁻¹	0,10	32,10	0,0048	4,53	5,80	0,75	0,87
Ca		0,70	455,90	0,0055	5,81	5,50	0,99	0,99
Mg		0,50	63,50	0,0063	5,32	2,20	0,99	0,99
K		0,90	327,70	0,0074	5,62	25,30	0,97	0,98
S	g ha ⁻¹	0,01	32,00	0,0046	4,62	1,00	0,99	0,99
Zn		1,20	1641,10	0,0047	3,68	87,50	0,97	0,99
B		0,70	238,40	0,0042	3,75	22,40	0,92	0,96

⁺ calculados a partir de 1 a 3000 DDS, RMSE: raíz del error cuadrático medio, PS: peso seco, R²: coeficiente de determinación y ρ : coeficientes de correlación. / ⁺ calculated from 1 to 3000 DAP, RMSE: root mean square error, PS: dry weight, R²: coefficient of determination and ρ : correlation coefficients.

Cuadro 6. Parámetros estimados, R^2 y requerimiento nutricional proyectado de cada elemento para producción de fruta fresca de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) en cinco unidades de producción ubicados en los cantones de Liberia y Santa Cruz Guanacaste, Costa Rica, evaluado durante el 2017-2020.

Table 6. Estimated parameters, R^2 , and projected nutritional requirements for each element for fresh fruit production of dragon fruit (*H. costaricensis* and *H. monacanthus*) in five production units located in the cantons of Liberia and Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, evaluated during 2017-2020.

Nutrimento	Y	R^2	Proyección kg fruta fresca				
			500	1000	2500	5000	10 000
N	$1,6724X + 0,0029$	0,87	0,8	1,7	4,2	8,4	16,7
P	$0,2932X + 0,0011$	0,90	0,1	0,3	0,7	1,5	2,9
Ca	$0,3080X + 0,048$	0,60	0,2	0,3	0,8	1,5	3,1
Mg	$0,4232X + 0,0048$	0,88	0,2	0,4	1,1	2,1	4,2
K	$3,1819X + 0,0688$	0,88	1,6	3,2	8,0	15,9	31,8
S	$0,1489X + 0,0008$	0,85	0,1	0,1	0,4	0,7	1,5
Fe	$5,5854X + 0,0818$	0,75	2,8	5,6	14,0	27,9	55,9
Cu	$1,0078X + 0,0212$	0,69	0,5	1,0	2,5	5,0	10,1
Zn	$4,8238X + 0,2757$	0,44	2,4	4,8	12,1	24,1	48,2
Mn	$7,9580X + 0,9492$	0,33	4,0	8,0	19,9	39,8	79,6
B	$1,7595X + 0,2893$	0,12	0,9	1,8	4,5	9,1	18,1
Mo	$0,0777X + 0,0008$	0,63	0,0	0,1	0,2	0,4	0,8
Ni	$0,1384X + 0,0003$	0,43	0,1	0,1	0,3	0,7	1,4

Discusión

Los requerimientos nutricionales para la pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*) bajo las condiciones agroclimáticas donde se realizó esta investigación, deben basarse en dos momentos fenológicos (crecimiento vegetativo, producción), que se encuentran después de los 1220 DDS de crecimiento, debido a que el incremento de la biomasa se encontró entre los primeros 1220 DDS. Esto representa un 85 % del crecimiento del cultivo, lo que indica que nutrientes como N, P, K, Ca, Zn y B son esenciales en los planes de fertilización en las primeras etapas del cultivo (Bertsch, 2009). Este crecimiento exponencial durante los primeros 3,4 años es respaldado por las mediciones determinadas en la TCC y el área foliar (Figura 1). Mientras que después de los 1220 DDS es importante incluir en el plan nutricional el requisito de producción de fruta (Cuadro 6). Estos parámetros no se utilizan en las fertilizaciones actuales en los cultivos de pitahaya en Costa Rica (López-Turcioa & Guido-Miranda, 1998; Vega Villalobos & Musmanni Quintana, 2005), debido a que utilizan fertilizaciones generalizadas con aplicaciones excesivas de algunos nutrimentos (N, P, K), sin calibración previa según las etapas/días de crecimiento del cultivo. Por lo tanto, es importante dividir los planes de fertilización en dos grupos, un plan de fertilización basado en el crecimiento de planta (antes de 1220 DDS) y otro basado en producción de frutas (después de los 1220 DDS).

En la actualidad los agricultores no utilizan planes de fertilización basados en producción de frutas solo en requisitos de crecimiento. El uso de requerimientos específicos por crecimiento vegetativo y por producción de frutas es usado para el manejo eficiente de nutrimentos en cultivos perenes (Fairhurst & Härdter, 2012; Ganeshamurthy et al., 2015; Kalcsits et al., 2020; Li et al., 2019; Srivastava & Malhotra, 2017). Durante este estudio, el periodo de mayor producción de fruta para las cinco unidades de producción en estudio fue durante mayo-setiembre. Esto indica que, a partir de los 3,5 años, es el inicio de producción de frutas.

Las concentraciones de los nutrimentos en las diferentes partes de la planta podrían variar según la fórmula o fertilización usada en cada unidad de manejo. Esto se demostró al ver las variaciones entre el Zn y B (Cuadro 3). La flor es una estructura que tiene alta concentración de N, K y B, esto puede indicar que incrementar estos nutrimentos en el fraccionamiento en meses próximos a la floración (febrero - abril) podría aumentar la floración del cultivo y por tanto, en polinización - fructificación del cultivo (Campos Granados, 2022). En otros cultivos perennes se ha demostrado que conforme crece el fruto las concentraciones de los nutrimentos varían en el tiempo (Paramasivam et al., 2000; Silber et al., 2018; Wang et al., 2008). Por lo tanto, se debe enfatizar en la utilización correcta de nutrientes específicos según la demanda anual de cada nutriente o el estado fenológico de las plantas.

El K es uno de los nutrientes de mayor demanda de las plantas de pitahaya, por estar vinculado en la calidad y sabor de las frutas (Bertsch, 2009), por lo que requiere de un ajuste correcto y preciso en los planes de fertilización del cultivo. Para cada DDS evaluado en este experimento, el K mostró un comportamiento de mayor incremento en los contenidos de las plantas, al igual que la concentración en las cáscaras de los frutos. Este último fue similar a lo encontrado en otros trabajos (Botella et al., 2017). Es probable que este efecto coincida con que la mayor cantidad de frutas se produjo en los cladodios más nuevos y maduros en el cultivo. Esto se respalda con otros trabajos, los cuales reportan que existe una reducción en el crecimiento de frutos en los cladodios más antiguos (Arredondo et al., 2022; Chu & Chang, 2020; Fontanetti Rodrigues et al., 2021).

El uso de un modelo logístico para modelar la absorción de nutrimentos es eficiente para predecir los requerimientos diarios por la planta, mientras que el modelo de regresión lineal es preciso para estimar absorción nutricional de las frutas. Las validaciones encontradas para ambos modelos determinaron ajustes precisos para la predicción en la absorción de nutrimentos. Algunos estudios en el cultivo de la pitahaya (*Hylocereus setaceus*) en Brasil, calcularon modelos logísticos de absorción de nutrimentos hasta los 360 DDS (de Castro Lima et al., 2019), no obstante, se encontraron que la planta consigue estabilizar su crecimiento a los 1250 DDS, lo cual coincide con los resultados de este trabajo (Figura 2). Las regresiones lineales en este estudio permiten cuantificar de forma precisa los requerimientos que necesita una unidad de manejo agronómica, basado en el historial de producción y rendimientos específicos según la edad del cultivo.

Los modelos logísticos han sido estudiados en otros cultivos con el objetivo de tener una aproximación matemática de comportamiento en el crecimiento o absorción de nutrimentos (Carranza et al., 2009; García & García et al., 2003; Overman et al., 2003; Zhang et al., 2017). En este trabajo, ambas aproximaciones fueron modeladas de forma determinística, es decir se encontraron los parámetros de ajuste al modelo con las soluciones numéricas.

El modelo logístico basado en parámetros de crecimiento fue más preciso para la mayoría de los nutrimentos que el modelo basado en parámetros fotosintéticos. No obstante, este último no se debe descartar como una posible herramienta para investigar sobre el crecimiento de los cultivos (Kawano et al., 2020; Shabani et al., 2014; Xiangxiang et al., 2014). Los parámetros ambientales son difíciles de controlar y analizar para cultivos de crecimiento lento, ya que requieren de condiciones controladas o sensores de mediciones constantes (Kawano et al., 2020; Lim et al., 2015; Montanaro et al., 2006). Sin embargo, para futuros trabajos en modelos de cultivos solo se requiere de modificar los parámetros fotosintéticos y observar el crecimiento en función a una variación ambiental (Feller et al., 2015; Gajanayake et al., 2015; Kawano et al., 2020; Montanaro et al., 2006). Además, es importante volver a analizar la información de absorción actuales (Bertsch, 2009) en el país, con el fin de parametrizar de forma determinista la absorción de nutrimentos en los cultivos basado en la ecuación logística de absorción de nutrientes desarrollada en este estudio. De esta manera cada cultivo podría tener parámetros deterministas para cuantificar las absorciones diarias de los nutrimentos.

Conclusiones

En el marco de las condiciones que fue realizado este trabajo y con base en el objetivo planteado, se considera que los modelos logísticos tuvieron alta precisión para modelar de manera determinística la absorción de nutrientes en plantas de pitahaya (*H. costaricensis* y *H. monacanthus*).

Este estudio logró cuantificar y modelar eficientemente el comportamiento nutricional de planta de pitahaya en condiciones de trópico estacional seco de Costa Rica, lo que proporciona información para el estudio de programas de fertilización. Hubo dos momentos fenológicos clave en el cultivo de pitahaya que se sugiere evaluar para planificar la fertilización: durante el crecimiento vegetativo y en la etapa de producción (después de los 1250 dds).

Este trabajo brinda una herramienta para proyectar los requerimientos nutricionales de la fruta fresca de pitahaya.

La estimación de los parámetros de " Y_{ini} , Y_{max} , a, b" en el "modelo basado en la absorción de nutrientes" de este estudio posibilita la cuantificación de absorción de nutrimentos en otras plantas, siempre que se ajusten con datos experimentales de absorción.

Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a los agricultores de Coopepitahaya, así como a Marvin Araya, Mario Rivas, Pilar Rivas y a todas las personas que, de una u otra manera, enriquecieron esta investigación con su generosa donación de material vegetal y frutas. Su colaboración fue esencial para el desarrollo de los modelos presentados en este documento. Además, extendemos nuestro agradecimiento a los estudiantes y técnicos de la Finca Experimental de Santa Cruz por su valiosa colaboración en los análisis realizados durante esta investigación.

Referencias

- Amato Moreira, R., Monteiro da Cruz, M. do C., Ramalho Fernandes, D., de Barros e Silva, E., & de Oliveira, J. (2016). Nutrient accumulation at the initial growth of pitaya plants according to phosphorus fertilization. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(3), 230–237. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4640813>
- Arredondo, E., Chiamolera, F. M., Casas, M., & Cuevas, J. (2022). Comparing different methods for pruning pitaya (*Hylocereus undatus*). *Horticulturae*, 8(7), Article 661. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070661>
- Auzanneau, J., Huyghe, C., Escobar-Gutiérrez, A. J., Julier, B., Gastal, F., & Barre, P. (2011). Association study between the gibberellic acid insensitive gene and leaf length in a *Lolium perenne* L. synthetic variety. *BMC Plant Biology*, 11(1), Article 183. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-183>
- Bertsch, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. Asociación Costarricense de la Ciencia de Suelos.
- Botella, M. Á., Arévalo, L., Mestre, T. C., Rubio, F., García-Sánchez, F., Rivero, R. M., & Martínez, V. (2017). Potassium fertilization enhances pepper fruit quality. *Journal of Plant Nutrition*, 40(2), 145–155. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1201501>
- Cabalceta, G., & Molina, E. (2006). Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 31–44. <https://doi.org/10.15517/rac.v30i2.6808>

- Campos Granados, M. F. (2022). *Análisis del crecimiento, desarrollo y maduración de frutos de pitahaya roja Hylocereus spp.* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio de la Universidad de Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/19435>
- Carranza, C., Lanchero, O., Miranda, D., & Chaves, B. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) ‘Batavia’ cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 27(1), 41–48. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/11330>
- Chu, Y.-C., & Chang, J.-C. (2020). High temperature suppresses fruit/seed set and weight, and cladode regreening in red-fleshed ‘Da Hong’ pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) under controlled conditions. *HortScience*, 55(8), 1259–1264. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15018-20>
- Corres Antonio, D. (2006). *Efecto del fertirriego en la propagación sexual y asexual de la pitahaya (Hylocereus undatus) bajo cultivo sin suelo* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio del Instituto Politecnico Nacional de Oaxaca. http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/19
- de Castro Lima, D., Barbosa Mendes, N. V., de Madeiros Corrêa, M. C., Kenji Taniguchi, C. A., Fernandes Queiroz, R., & Natale, W. (2019). Growth and nutrient accumulation in the aerial part of red Pitaya (*Hylocereus* sp.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41(5), Article e-030. <https://doi.org/10.1590/0100-29452019030>
- de Castro Lima, D., Basrbosa Mendes, N. V., Saldanha Diógenes, M. F., de Madeiros Corrêa, M. C., Natale, W., & Kenji Taniguchi, C. A. (2021). Initial growth and nutrient accumulation in pitaya plants at different phenological stages. *Revista Caatinga*, 34(3), 720–727. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n324rc>
- Esquivel, P., & Araya Quesada, Y. (2012). Características del fruto de la pitahaya (*Hylocereus* sp.) y su potencial de uso en la industria alimentaria. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 113–129. <https://sites.google.com/site/1rvcta/v3-n1-2012/r7?pli=1>
- Esquivel, P., Stintzing, F.C., & Carle, R. (2007). Comparison of morphological and chemical fruit traits from different pitahaya genotypes (*Hylocereus* sp.) grown in Costa Rica. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 81(1), 7–14. <https://ojs.openagrar.de/index.php/JABFQ/article/view/2103>
- Fairhurst, T., & Härdter, R. (2012). *Palma aceitera. Manejo para rendimientos altos y sostenibles*. International Plan Nutrition Institute and International Potash Institute.
- Feller, C., Favre, P., Janka, A., Zeeman, S. C., Gabriel, J.-P., & Reinhardt, D. (2015). Mathematical modeling of the dynamics of shoot-root interactions and resource partitioning in plant growth. *PLOS ONE*, 10(7), Article e0127905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127905>
- Fontanetti Rodrigues, M. G., Arruda Ferreira, A. F., da Silva Malagutti, E., dos Santos Pinto, M., Honorato Monteiro, L. N., & Esutáquio de Sá, M. (2021). Cladode size and collection time for pitahaya propagation. *Ciência e Agrotecnologia*, 45, Artículo e004821. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145004821>
- Gabriel y Galán, J. M., Prada, C., Martínez-Calvo, C., & Lahoz-Beltrá, R. (2015). A Gompertz regression model for fern spores germination. *Anales Del Jardín Botánico de Madrid*, 72(1), Article e015. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2405>
- Gajanayake, B., Reddy, R. K., & Shankle, M. W. (2015). Quantifying Growth and Developmental Responses of Sweetpotato to Mid- and Late-Season Temperature. *Agronomy Journal*, 107(5), 1854–1862. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0545>
- Ganeshamurthy, A., Kalaivanan, D., Selvakumar, G., & Panneerselvam, P. (2015). Nutrient management in horticultural crops. *Indian Journal of Horticulture*, 11(12), 30–42.

- Garbanzo-León, G., Chavarría-Pérez, G., & Vega-Villalobos, E. V. (2019). Correlaciones alométricas en *Hylocereus costaricensis* y *H. monacanthus* (pitahaya): una herramienta para cuantificar el crecimiento. *Agronomía Mesoamericana*, 30(2), 425–436. <https://doi.org/10.15517/am.v30i2.33574>
- Garbanzo-León, G., Vega-Villalobos, E. V., Rodríguez-Cisneros, J., Urbina-Briceño, C., Lázaro-Rojas, W., Alvarado-Jara, K., Barrientos-Bolaños, R., Duarte-Ortíz, K., Mora-Prendas, J., Trujillo-Olivas, V., & Rojas-Varela, J. (2021). Evaluación de tamaño de cladodios y bio-estimulantes de enraizamiento para la propagación de pitahaya. *Agronomía Costarricense*, 45(2), 29–40. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i2.47765>
- García Barquero, M. E., & Quirós Madrigal, O. (2010). Analisis del comportamiento de mercado de la pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Tecnología en Marcha*, 23(2), 14–24. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/62/61
- García y García, A., Dourado-Neto, D., del Valle Basanta, M., López Ovejero, R. F., & Laércio Favarin, J. (2003). Logistic rice model for dry matter and nutrient uptake. *Scientia Agricola*, 60(3), 481–488. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000300011>
- Génard, M., & Huguet, J. G. (1996). Modeling the response of peach fruit growth to water stress. *Tree Physiology*, 16(4), 407–415. <https://doi.org/10.1093/treephys/16.4.407>
- Gur, A., Osorio, S., Fridman, E., Fernie, A. R., & Zamir, D. (2010). hi2-1, A QTL which improves harvest index, earliness and alters metabolite accumulation of processing tomatoes. *Theoretical and Applied Genetics*, 121(8), 1587–1599. <https://doi.org/10.1007/s00122-010-1412-8>
- Hau, B. (1993). Mathematical functions to describe disease progress curves of double sigmoid pattern. *Phytopathology*, 83(7), Article 928. <https://doi.org/10.1094/Phyto-83-928>
- Hernández-Ramos, L., García-Mateos, M. del R., Castillo González, A. M., Ybarra Moncada, C., & Nieto-Ángel, R. (2020). Fruits of the pitahaya *Hylocereus undatus* and *H. ocamponis*: nutritional components and antioxidants. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 93, 197–203. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2020.093.024>
- Hunt, H. (1979). Plant growth analysis: The rationale behind the use of the fitted mathematical function. *Annals of Botany*, 43, 245–249. <https://www.jstor.org/stable/42756459>
- Johnston, A. M., & Bruulsema, T. W. (2014). 4R Nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. *Procedia Engineering*, 83, 365–370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.029>
- Kalcsits, L., Lotze, E., Tagliavini, M., Hannam, K. D., Mimmo, T., Neilsen, D., Neilsen, G., Atkinson, D., Casagrande Biasuz, E., Borruso, L., Cesco, S., Fallahi, E., Pii, Y., & Valverdi, N. A. (2020). Recent achievements and new research opportunities for optimizing macronutrient availability, acquisition, and distribution for perennial fruit crops. *Agronomy*, 10(11), Article 1738. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111738>
- Kawano, T., Wallbridge, N., & Plummer, C. (2020). Logistic models for simulating the growth of plants by defining the maximum plant size as the limit of information flow. *Plant Signaling & Behavior*, 15(2), Article 1709718. <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1709718>
- Le Bellec, F., Vaillant, F., & Imbert, E. (2006). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a new fruit crop, a market with a future. *Fruits*, 61(4), 237–250. <https://doi.org/10.1051/fruits:2006021>
- Li, W., Yang, M., Wang, J., Wang, Z., Fan, Z., Kang, F., Wang, Y., Luo, Y., Kuang, D., Chen, Z., Guo, C., Li, Y., He, X., Chen, X., Shi, X., & Zhang, Y. (2019). Agronomic Responses of major fruit crops to fertilization in China: A meta-analysis. *Agronomy*, 10(1), Article 15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010015>

- Lim, C. A. A., Awan, T. H., Sta. Cruz, P. C., & Chauhan, B. S. (2015). Influence of environmental factors, cultural practices, and herbicide application on seed germination and emergence ecology of *Ischaemum rugosum* Salisb. *PLOS ONE*, 10(9), Article e0137256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137256>
- Lipovetsky, S. (2010). Double logistic curve in regression modeling. *Journal of Applied Statistics*, 37(11), 1785–1793. <https://doi.org/10.1080/02664760903093633>
- López-Turcios, O., & Guido-Miranda, A. (1998). Evaluación de dosis de nitrógeno y fósforo en el cultivo de pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Agronomía Mesoamericana*, 9(1), 66–71. <https://doi.org/10.15517/am.v9i1.24635>
- Lucena Cavalcante, Í. H., Geraldo Martins, A. B., da Silva Júnior, G. B., Fonseca da Rocha, L., Falcão Neto, R., & Ferreira Cavalcante, L. (2011). Adubação orgânica e intensidade luminosa no crescimento e desenvolvimento inicial da Pitaya em Bom Jesus-PI. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33(3), 970–983. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000086>
- Luu, T.-T.-H., Le, T.-L., Huynh, N., & Quintela-Alonso, P. (2021). Dragon fruit: A review of health benefits and nutrients and its sustainable development under climate changes in Vietnam. *Czech Journal of Food Sciences*, 39(2), 71–94. <https://doi.org/10.17221/139/2020-CJFS>
- Mizrahi, Y. (2014). Vine-cacti pitayas: the new crops of the world. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36(1), 124–138. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-452/13>
- Montanaro, G., Dichio, B., Xiloyannis, C., & Celano, G. (2006). Light influences transpiration and calcium accumulation in fruit of kiwifruit plants (*Actinidia deliciosa* var. *deliciosa*). *Plant Science*, 170(3), 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.10.004>
- Morales-Ayala, Y., Ceja-Torres, L., Méndez-Inocencio, C., Silva-García, T., Venegas-González, J., & Pineda-Pineda, J. (2020). Respuesta vegetativa de pitahaya (*Hylocereus* spp.) a la aplicación de vermicompost y fertirriego. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(3), Article 90. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.2923>
- Moreira, R.A.; Cruz, M.C.M.; Fernandes, D.R.; Silva, E.B.; Oliveira, J. (2016). Nutrient accumulation at the initial growth of pitaya plants according to phosphorus fertilization. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(3), 230–237. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4640813>
- Moustakas, N. K., Akoumianakis, K. A., & Passam, H. C. (2011). Patterns of dry biomass accumulation and nutrient uptake by okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench.) under different rates of nitrogen application. *Australian Journal of Crop Science*, 5(8), 993–1000. http://www.cropj.com/Moustakas_5_8_2011_993_1000.pdf
- Nofriandi, I., Barchia, F., Fahrurrozi, F., Simanihuruk, B. W., & Sukarjo, E. I. (2021). Stem Cutting Growth of Red Dragon Fruit (*Hylocereus costaricensis*) due to Application of Cow Manure and KCl in Andosol. *TERRA : Journal of Land Restoration*, 4(2), 48–52. <https://doi.org/10.31186/terra.4.2.48-52>
- Orrico Zalazar, G. (2013). *Respuesta de la pitahaya amarilla (Cereus triangularis L.) a la aplicación complementaria de dos fertilizantes en tres dosis* [Tesis de licenciatura, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional de la Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1041>
- Ortiz-Hernández, Y. D., & Carrillo-Salazar, J. A. (2012). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a short review. *Comunicata Scientiae*, 3(4), 220–237. <https://comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/334>
- Overman, A. R., Scholtz, R. V., & Martin, F. G. (2003). In defense of the extended logistic model of crop production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(5–6), 851–864. <https://doi.org/10.1081/CSS-120018979>

- Paramasivam, S., Alva, A. K., Hostler, K. H., Easterwood, G. W., & Southwell, J. S. (2000). Fruit nutrient accumulation of four orange varieties during fruit development 1. *Journal of Plant Nutrition*, 23(3), 313–327. <https://doi.org/10.1080/01904160009382018>
- Qiu, R., Du, T., Kang, S., Chen, R., & Wu, L. (2015). Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China. *Agricultural Systems*, 138, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.05.001>
- R Core Team. (2022). *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Retana-Sánchez, K., Blanco-Meneses, M., & Castro-Zúñiga, O. (2018). Etiología del cáncer del tallo provocado por *Neoscytalidiumdimidiatum* (penz) en *Hylocereus costaricensis*, en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 21–33. <https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35646>
- Rodríguez, W., & Leihner, D. (2006). *Análisis del crecimiento vegetal*. Universidad de Costa Rica.
- Sepaskhah, A. R., Fahandezh-Saadi, S., & Zand-Parsa, S. (2011). Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management. *Agricultural Water Management*, 99(1), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.019>
- Shabani, A., Sepaskhah, A. R., & Kamgar-Haghighi, A. A. (2014). Estimation of yield and dry matter of rapeseed using logistic model under water salinity and deficit irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(7), 951–969. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.858807>
- Shabani, A., Sepaskhah, A. R., Kamgar-Haghighi, A. A., & Honar, T. (2018). Using double logistic equation to describe the growth of winter rapeseed. *The Journal of Agricultural Science*, 156(1), 37–45. <https://doi.org/10.1017/S0021859617000934>
- Silber, A., Naor, A., Cohen, H., Bar-Noy, Y., Yechieli, N., Levi, M., Noy, M., Peres, M., Duari, D., Narkis, K., & Assouline, S. (2018). Avocado fertilization: Matching the periodic demand for nutrients. *Scientia Horticulturae*, 241, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.094>
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (Eds.). (2012). *Modeling physiology of crop development, growth and yield*. CAB International. <https://www.cabdigitalibrary.org/doi/book/10.1079/9781845939700.0000>
- Srivastava, A. K., & Malhotra, S. K. (2017). Nutrient use efficiency in perennial fruit crops—A review. *Journal of Plant Nutrition*, 40(13), 1928–1953. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1249798>
- Tarara, J. M., Blom, P. E., Shafii, B., Price, W. J., & Olmstead, M. A. (2009). Modeling Seasonal Dynamics of Canopy and Fruit Growth in Grapevine for Application in Trellis Tension Monitoring. *HortScience*, 44(2), 334–340. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.334>
- Vega Villalobos, E., & Musmanni Quintana, M. (2005). *Recoleccion, reproduccion t adaptacion de frutales no tradicionales y exóticos del tropico seco de Costa Rica* [Informe proyecto, VI-520-96-329.]. Universidad de Costa Rica. <https://vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/projects/96329>
- Viñas, M., Fernández-Brenes, M., Azofeifa, A., & Jiménez, V. M. (2012). In vitro propagation of purple pitahaya (*Hylocereus costaricensis* [F.A.C. Weber] Britton & Rose) cv. Cebra. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 48, 469–477. <https://doi.org/10.1007/s11627-012-9439-y>

- Wang, Z.-H., Li, S.-X., & Malhi, S. (2008). Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(1), 7–23. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3084>
- Xiangxiang, W., Quanjiu, W., Jun, F., Lijun, S., & Xinlei, S. (2014). Logistic model analysis of winter wheat growth on China's Loess Plateau. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(8), 1471–1479. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-293>
- Zerpa-Catanho, D., Hernández-Pridybailo, A., Madrigal-Ortiz, V., Zúñiga-Centeno, A., Porras-Martínez, C., Jiménez, V. M., & Barboza-Barquero, L. (2019) Seed germination of pitaya (*Hylocereus* spp.) as affected by seed extraction method, storage, germination conditions, germination assessment approach and water potential. *Journal of Crop Improvement*, 33(3), 372–394. <https://doi.org/10.1080/15427528.2019.1604457>
- Zhang, W.-P., Liu, G.-C., Sun, J.-H., Fornara, D., Zhang, L.-Z., Zhang, F.-F., & Li, L. (2017). Temporal dynamics of nutrient uptake by neighbouring plant species: evidence from intercropping. *Functional Ecology*, 31(2), 469–479. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12732>