



INSTITUTO NACIONAL DE
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA
EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

GOBIERNO
DE COSTA RICA

ALCANCES TECNOLÓGICOS

REVISTA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

VOLUMEN 17

NÚMERO 1

AÑO 2024



PRÁCTICAS DE MANEJO CONVENCIONAL E INTEGRADO DEL NEMATODO DEL QUISTE DE LA PAPA (*Globodera pallida* Stone 1973) EN CARTAGO, COSTA RICA¹

Álvaro Rodríguez Cordero², Ricardo Piedra Naranjo³, Walter Peraza Padilla⁴

RESUMEN

Prácticas de manejo del nematodo del quiste de la papa (*Globodera pallida* Stone 1973) en Cartago, Costa Rica. El género *Globodera*, conocido como el nematodo del quiste de la papa, es una de las principales plagas de este tubérculo a nivel mundial y en Costa Rica es uno de los aspectos fitosanitarios que más afectan este cultivo. El objetivo general de este estudio fue comparar la densidad poblacional de *Globodera pallida* en parcelas manejadas con prácticas convencionales versus las que se les implementó un manejo integrado. El estudio se realizó en la Estación Experimental Carlos Durán en Oreamuno de Cartago, durante septiembre de 2016 a febrero de 2017. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones para el tratamiento convencional (TC) y Tratamiento Integrado (TI). Estas muestras se utilizaron para evaluar la viabilidad de quistes en 250 g de suelo, así como obtener el promedio de huevos y larvas en 25 unidades. Los datos se analizaron mediante un modelo lineal generalizado de mediciones repetidas con el tiempo (muestreos) para las variables quistes y larvas de *G. pallida*, mediante el procedimiento Mixed de SAS® 9.4. No se encontraron diferencias significativas en la interacción de los tratamientos por muestreo con relación a la cantidad de quistes presentes en 250 g de suelo, bajo las condiciones de estudio, entre los dos métodos de manejo (convencional e integrado).

Palabras clave: Control biológico, nematodo quiste de la papa, umbral de daño, viabilidad.

- 1 Esta investigación formó parte de los resultados del trabajo final de graduación de Licenciatura en Agronomía del primer autor. Universidad Nacional (UNA). Costa Rica.
- 2 Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). Región Valle Occidental. San Ramón, Alajuela. Costa Rica. varorodri07@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-8563-275X>)
- 3 ripina2@gmail.com (Investigador jubilado. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) <https://orcid.org/0000-0002-1433-1834>).
- 4 Universidad Nacional, Laboratorio de Nematología, Heredia, Costa Rica. Apartado Postal 86-3000. walter.peraza.padilla@una.cr (<https://orcid.org/0000-0003-4651-5555>).

ABSTRACT

Management practices of the potato cyst nematode (*Globodera pallida* stone 1973) in Cartago, Costa Rica. The genus *Globodera*, known as the potato cyst nematode (PCN), is one of the main pests of this tuber worldwide, and in Costa Rica it is one of the phytosanitary aspects that most affects this crop. The general objective of this study was to compare the population density of *Globodera pallida* in plots managed with conventional practices versus those in which integrated management was implemented. The study was conducted at the Carlos Durán Experimental Station in Oreamuno de Cartago, from September 2016 to February 2017. A randomized complete block design with three repetitions was used for the Conventional Treatment (CT) and Integrated Treatment (IT). These samples were used to assess the viability of the cyst in 250 g of soil, as well as to obtain the average number of eggs and larvae in 25 cysts. Data were analyzed using a generalized linear model for repeated measurements over time (samplings) for the variables cysts and *G. pallida* larvae, using the SAS® 9.4 Mixed procedure. No significant differences were found in the interaction of the sampling treatments in relation to the number of cysts present in 250 g of soil, under the study conditions, between the two management methods (conventional and integrated).

Keywords: Biological control, potato cyst nematode, damage threshold, viability.

INTRODUCCIÓN

El género *Globodera* spp., es un nematodo que pertenece a la familia Heteroderidae y es conocido por causar pérdidas importantes en rendimiento en los cultivos de papa (*Solanum tuberosum*) en todo el mundo (Sullivan et al., 2007). El origen de esta plaga se sitúa en las montañas de los Andes en América del Sur y fue introducida a Europa en el siglo XIX a través del cultivo de la papa (OIRSA, 2015). La distribución de esta plaga es amplia y se registra principalmente en el hemisferio norte, centro y sur de Europa, así como en Sudamérica, Centroamérica y México (Vilca, 2013).

A nivel mundial, las pérdidas en el rendimiento del cultivo de papa debido a esta plaga son significativas, estimándose en 100 millones de dólares (Barría, 2010). Además, los costos adicionales asociados con el uso de nematicidas ascienden a aproximadamente 13.5 millones de dólares (Lord et al., 2011). Este nematodo reduce tanto la calidad como la cantidad de los tubérculos, lo que provoca pérdidas de hasta un 12 % del promedio mundial (García, 2006).

Se estima que la presencia de 20 huevos por gramo de suelo de *G. pallida* es suficiente para ocasionar pérdidas de alrededor de 2t/ha en el cultivo de papa. Además, cuando las densidades poblacionales de esta plaga son muy altas, aproximadamente el 80 % de la cosecha de este tubérculo no se llega a aprovechar (Smith et al., 1997).

En Centroamérica, los primeros reportes de la presencia de *G. pallida* se documentaron en 1967 en Panamá, en donde se propagó rápidamente y causó problemas graves en los cultivos de papa (Servicio Fitosanitario del Estado, 2015). En Costa Rica, se confirmó en 2005 la presencia de *G. pallida* en una investigación llevada a cabo por el Laboratorio de Nematología de la Universidad de Costa Rica. Esta investigación se realizó en una finca que cultivaba la variedad Floresta, ubicada en las cercanías del volcán Irazú (Coto, 2005).

Las zonas de Cartago y Zarcero, al ser las áreas con mayor producción y cultivo de papa en Costa Rica, se ven afectadas por la incidencia de nematodos fitoparásitos, incluidos los del género

Globodera (Servicio Fitosanitario del Estado, 2015). Esta plaga provoca diversos síntomas en el cultivo, como amarillamiento, crecimiento lento, clorosis y marchitez de las plantas, lo que a su vez reduce de la calidad y el rendimiento de la producción (Coto, 2005).

En las raíces del cultivo de la papa, es común observar la formación de quistes, excesiva ramificación, puntas dañadas, lesiones y pudriciones, especialmente cuando las infecciones de estos nematodos se acompañan de otros patógenos como bacterias y hongos (Martínez, 2011). Las plantas afectadas también experimentan reducción en la producción, lo que resulta en bajos rendimientos y en una disminución considerable de las parcelas y fincas.

La propagación de los estadios juveniles es baja y se limita principalmente a las raíces de la planta hospedera. Sin embargo, su dispersión pasiva puede ocurrir a largas distancias a través de la tierra adherida en maquinaria agrícola y tubérculos cosechados (Ebrahimi et al., 2016). Prácticas de manejo inapropiadas, como la venta de semillas no certificadas, el uso inadecuado del agua, la manipulación del suelo y la limpieza de herramientas pueden contribuir también a su dispersión (Piedra, 2012). De acuerdo con Martínez (2012), el método más común de propagación del nematodo es el traslado de semillas de papa de una finca a otra.

Diversas estrategias de control son empleadas para prevenir el aumento de las poblaciones de este nematodo. Estas prácticas incluyen la rotación de cultivos, el mejoramiento genético, el uso de técnicas culturales adecuadas y la recolección de rastros (Andrés, 2002). Adicionalmente, para el manejo de *Globodera*, se llevan a cabo aplicaciones de hongos nematófagos, el uso de plantas antagónicas, biofumigantes y la incorporación de enmiendas orgánicas, así como la aplicación nematicidas químicos (Valencia-Serna et al., 2014; Schapovaloff et al., 2015; Vázquez et al., 2020).

En la actualidad, existe una creciente tendencia a reemplazar los métodos químicos por alternativas más sostenibles como el uso de productos botánicos, solarización, enmiendas, rotación de cultivos, agentes control biológico entre otros (Ochola et al., 2020). Este cambio se debe a la preocupación por la contaminación y la necesidad de conservar el ambiente (Lord et al., 2011). Sin embargo, muchos productores no implementan medidas para prevenir la diseminación de la plaga en sus fincas, lo que lleva a las casas comerciales a promover el uso de nematicidas químicos en grandes cantidades, a menudo sin un conocimiento claro sobre su eficacia contra la plaga. Esta situación resulta en contaminación ambiental y un aumento de los costos de producción (Franco et al., 1993).

Varios estudios han demostrado que la incorporación de enmiendas orgánicas en suelos infestados con nematodos puede tener efectos positivos en la dinámica de los patógenos, al introducir organismos antagonistas y mostrar efectos tóxicos durante la descomposición (Termorshuizen et al., 2011). El manejo integrado no busca erradicar la plaga, sino mantener sus poblaciones a niveles que no causen daño económico (Rivera, 2009). Con base en este enfoque, es fundamental comparar métodos convencionales con el manejo integrado de plagas para mejorar la efectividad de las técnicas de control, reducir las poblaciones de nematodos y optimizar la productividad de los cultivos y los costos económicos asociados a su implementación.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar prácticas de manejo integrado y convencional y su efecto en la densidad poblacional del nematodo *G. pallida* en el cultivo de la papa en la Estación Carlos Durán en Oreamuno, Cartago, Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

El estudio se llevó a cabo desde septiembre de 2016 hasta febrero de 2017 en la Estación Experimental Carlos Durán, ubicada en Potrero Cerrado de Oreamuno, Cartago (N 09°55'08", O 83°52'43"). La zona de estudio se encuentra en un área subtropical húmeda, a una altitud de 2335 metros sobre el nivel del mar. Los suelos utilizados son de origen volcánico y la temperatura promedio fue de 17 °C, con una precipitación anual promedio de 2600 mm (Quesada, 2007; Tencio, 2013).

Durante el ensayo, la temperatura osciló entre 7° y 25 °C, condiciones que resultaron óptimas para el cultivo de papa. Además, no se experimentaron periodos de sequía debido a la presencia de una temporada de lluvias que se extendió desde mayo hasta enero en la zona.

Tratamientos

Los tratamientos evaluados para el combate del nematodo *G. pallida* fueron los siguientes:

Tratamiento convencional (TC): Se aplicó el nematicida químico carbamato durante la siembra en una cantidad de 0.0315 L en los 180m². Se realizó una segunda aplicación del mismo producto al momento de la aporca (22 días después de la siembra) en enero de 2017, con la misma dosis aplicada anteriormente. En este tratamiento, no se retiraron los rastrojos de papa después de la cosecha, lo que imitó la práctica común de los agricultores locales.

Tratamiento integrado (TI): Se empleó la cepa INTA H4 del hongo *Trichoderma* sp., combinada con la recolección de los rastrojos de papa. Esta cepa pertenece al Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). La primera aplicación se realizó a la siembra con una concentración de 8.4×10^6 conidios por mL. La segunda se llevó a cabo 22 días después, con una concentración del hongo de 2.0×10^7 conidios por mL de agua. La última se efectuó también con una concentración de 2.0×10^7 conidios del hongo por mL de agua una vez concluida la cosecha.

La siembra de tubérculos para ambos tratamientos se realizó a los 18 días del mes de octubre del año 2016 con el uso de la variedad Floresta. La fertilización se llevó a cabo según los análisis previos de la fertilidad del suelo de la parcela. La primera aplicación de fertilizante fue rica en fósforo con la fórmula 10-30-10. La segunda aplicación se realizó durante la aporca con una fórmula completa 18-5-15-6-0.2, que consistió en la aplicación de elementos mayores junto con la incorporación de sulfato de magnesio (6) y boro (0.2).

La primera aplicación de fertilizante fue rica en fósforo con la fórmula 10-30-10. La segunda aplicación se realizó durante la aporca con una fórmula completa 18-5-15-6-0.2, que consistió en la aplicación de elementos mayores junto con la incorporación de sulfato de magnesio (6) y boro (0.2).

En el tratamiento convencional, se emplearon medidas de control de plagas y enfermedades, que incluyeron la aplicación de un nematicida carbamato y un fungicida Tolclofos-metil. Este producto químico tuvo una acción preventiva y curativa contra la pudrición seca causada por el hongo *Fusarium* sp.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental en bloques al azar con tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental consistió en una parcela sembrada con la variedad de papa Floresta. El área de cada parcela fue de 60 m², con una separación de 0,85 m entre surcos y 0,25 m entre plantas. Cada parcela consistió en 35 plantas distribuidas en seis surcos, de las cuales 6; de estas, se utilizaron 6 plantas (las dos centrales de cada surco) para el ensayo, lo que sumó un total de 12 plantas útiles por parcela.

Las parcelas empleadas en este ensayo ya habían experimentado previamente la presencia de nematodos del género *Globodera* debido a cultivos anteriores de papa, lo cual se consideró como una infestación o inóculo inicial.

En cada unidad experimental se llevaron a cabo mediciones repetidas a lo largo del tiempo (muestreos), realizando un total de seis muestreos en cada bloque experimental.

Muestreo de suelo

Se llevaron a cabo seis muestreos para evaluar la densidad poblacional de quistes, larvas y huevos de *Globodera* en 250 g de suelo. La metodología consistió en tomar 10 puntos cerca de las raíces de las plantas con un barreno mediante recorridos en forma de zigzag a una profundidad de entre 15 a 25 cm en cada parcela de 60 m².

La primera recolecta de suelo realizó en septiembre del 2016, es decir, un mes antes de la siembra y culminó en febrero de 2017, un mes después de la cosecha. De esta manera se tomaron para un total de treinta y seis muestras según los tratamientos (18 de manejo convencional y 18 manejo integrado).

Luego, el suelo de cada tratamiento se mezcló y cuarteó hasta obtener un 1 kg por unidad experimental y se trasladó al laboratorio de Nematología del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) para su procesamiento y análisis.

Metodología para la extracción de quistes

Se empleó el método de Fenwick modificado (Fenwick, 1951; Oostenbrink, 1950) para extraer los quistes de suelo, utilizando una muestra de 250 g de suelo y un tamiz de 100 mesh (0.038 mm de abertura y un diámetro de 0,035 mm). Este procedimiento se basó en principios de separación por densidad, lo que permitió separar los quistes de los residuos orgánicos presentes en la muestra de suelo.

El suelo que tenía los quistes se transfirió a un balón aforado de 1 L, previamente llenado hasta la mitad con agua destilada. La muestra de 250 g de suelo fue agitada y mezclada para asegurar una dispersión homogénea y luego se completó el llenado del balón con más agua. A continuación, la mezcla se dejó reposar durante un minuto, lo que permitió que los quistes flotaran a la superficie mientras la materia orgánica más pesada se precipitaba al fondo. Después de este tiempo, el balón se inclinó cuidadosamente para permitir que la fracción superior, que contenía los quistes y las partículas flotantes, se decantara hacia

otro embudo que estaba equipado con papel para filtración. Este procedimiento garantizó que los quistes y las partículas flotantes quedaran atrapados y evitó que pasaran al balón aforado. Finalmente, la muestra filtrada se dejó secar a temperatura ambiente entre 24 y 25 °C. Una vez seco, los quistes fueron extraídos para proceder con los conteos y análisis correspondientes.

Metodología de viabilidad de larvas y huevos en quistes

Los quistes recolectados sobre el papel para filtración se utilizaron para realizar una prueba de viabilidad. Primero, se identificaron cuáles eran potencialmente de *Globodera* según sus características morfológicas. Luego, se llevó a cabo la extracción y obtención del promedio de huevos y juveniles en 25 ejemplares. Estos se trituraron con un homogenizador y se colocaron en 50 mL de agua. Posteriormente, se tomaron 2 mL de esta mezcla (quistes triturados más agua) con una pipeta y se transfirieron a una cámara de conteo donde se observaron al microscopio. Este proceso se repitió tres veces para obtener un promedio de la cantidad de huevos y juveniles en las tres alícuotas y mediante la siguiente fórmula se determinó la viabilidad de quistes (Piedra et al., 2008):

$$VT = \frac{\text{Prom. 2 ml} \times \text{Vol. H}_2\text{O}}{Q}$$

Dónde:

VT= Viabilidad Total

Prom= Promedio de 3 alícuotas

Q= Número de quiste

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de mediciones repetidas en el tiempo (muestreos) para las variables quistes y larvas de *G. pallida* utilizando el procedimiento Mixed de SAS® 9.4. Este análisis permitió evaluar la variabilidad de los datos y relacionar las mediciones a lo largo del tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico reveló que tanto el tratamiento convencional (TC) como el tratamiento integrado (TI) mostraron efectos similares en cuanto a la cantidad de quistes presentes, con un valor de ($p=0.1702$). Esto indica que no se encontraron diferencias significativas ($p=0.4399$) en la interacción de los tratamientos por muestreo en 250 g de suelo. Sin embargo, al observar las tendencias en las poblaciones de nematodos a lo largo del tiempo, se identificaron algunas variaciones entre los tratamientos, lo que sugiere que, a pesar de la falta de diferencias significativas, hubo una reducción en el número de quistes en uno de los meses en que se realizó el muestreo (Figura 1),

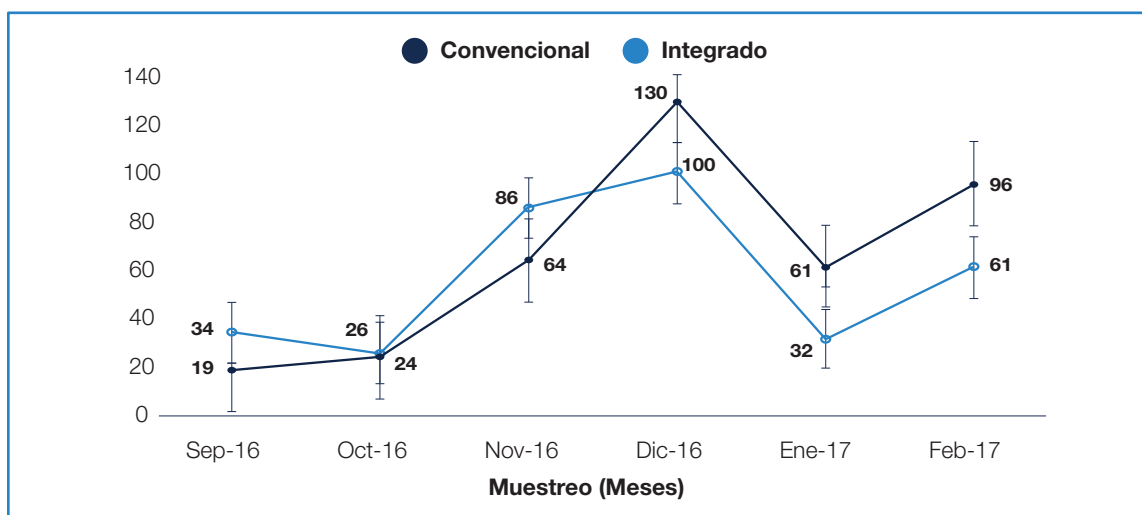


Figura 1. Efecto del tratamiento convencional e integrado sobre quistes de *G. pallida* por gramo de suelo. Estación Carlos Durán, Oreamuno, Cartago 2017.

Durante los primeros muestreos (mes 1 y 2), se registraron cantidades de 19 y 24 quistes para el (TC), mientras que en el (TI) se observó un incremento a 34 y 26. Este patrón inicial coincidió con la emergencia y el crecimiento del sistema radicular de la planta, lo que creó condiciones propicias para el establecimiento de los nematodos. A medida que avanzó la fase fenológica del cultivo, la población de quistes aumentó sustancialmente en los meses 3 y 4, donde alcanzó totales de 64 y 130 quistes en el (TC) y 86 y 100 en el (TI). Este aumento coincidió con la etapa de tuberización y el llenado de los tubérculos, donde las plantas transportan nutrientes a través del sistema radical, lo que intensifica su actividad fisiológica y facilita el surgimiento de nematodos (Rosende & Cabaleiro, 2003).

Al llegar al quinto muestreo, se observó una disminución en la cantidad de quistes en el (TC), con una reducción de 61 quistes respecto al mes

anterior, mientras que en el (TI) la disminución fue de 32 quistes en el mismo periodo. Esta disminución podría asociarse a la fase final de llenado de los tubérculos en el cultivo, reflejando una interacción compleja entre el ciclo de vida del nematodo y las etapas fenológicas del cultivo de la papa (Silva, 2018).

En el último muestreo del sexto mes, se registró un aumento en la cantidad de quistes en ambos tratamientos. En el (TC), la cantidad de quistes pasó de 61 a 96, mientras que en el (TI) aumentó de 32 a 61. Este incremento coincidió con la fase de maduración de los tubérculos y el inicio de un nuevo ciclo de *G. pallida*, que se completa en aproximadamente 65 días (Silva, 2018) (Figura 2).

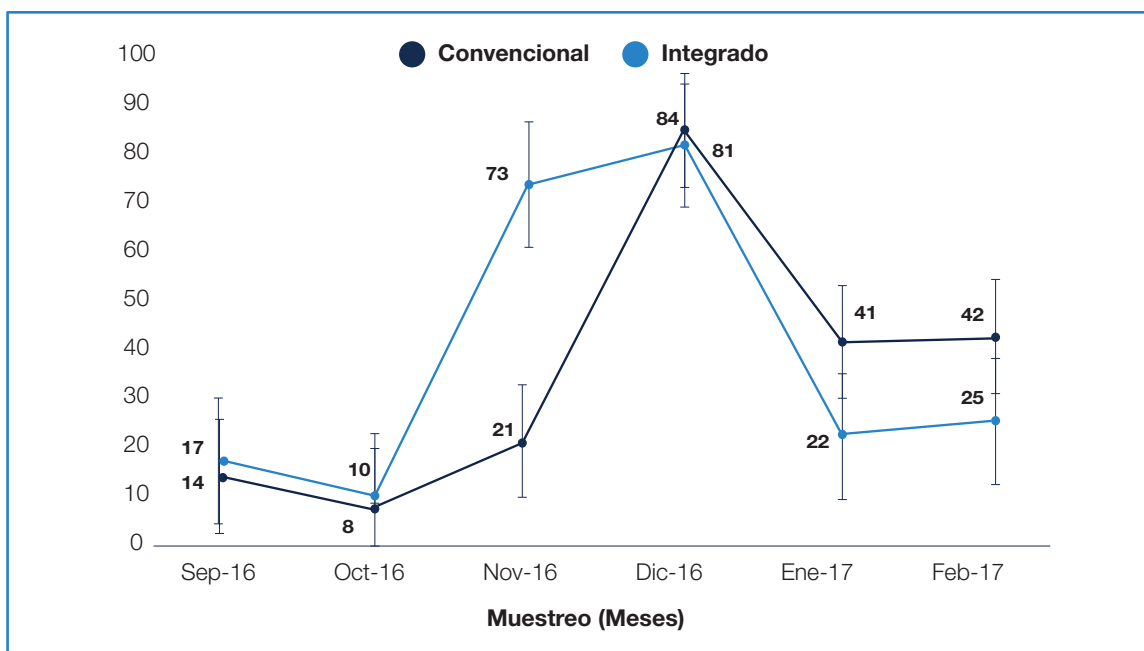


Figura 2. Variación en la cantidad de juveniles y huevos de *G. pallida* por gramo de suelo según tratamiento. Estación Carlos Durán, Oreamuno, Cartago 2017.

Con respecto a los rastros dejados en el tratamiento convencional (TC) y a aquellos recolectados en el tratamiento integrado (TI), se determinó que los rastros pueden contener quistes de *G. pallida*. Al dejarlos en el suelo, se fomenta la persistencia de estos organismos, lo que puede resultar en un aumento de la población de nematodos en ciclos futuros de cultivo. Esto se evidenció al final del sexto mes de muestreo, donde se registró un incremento en la cantidad de quistes. Este aumento recurrente en el tratamiento integrado (TI) podría deberse a que, aunque se implementan prácticas de manejo que buscan minimizar la población de nematodos, aún se mantienen rastros y quistes en el suelo que sirven de fuente de inóculo, permitiendo así la persistencia de *G. pallida*. Además, es posible que la rotación de cultivos y la inclusión de especies resistentes en el TI no sean suficientes para contrarrestar el efecto acumulativo de los quistes presentes en el suelo, lo que resulta en una mayor población de nematodos en comparación con el tratamiento convencional (TC). Como se mencionó anteriormente, esta práctica de dejar rastros es común entre los productores de papa.

En cuanto a juveniles y huevos de *G. pallida*, no se encontraron diferencias significativas por g de suelo entre los tratamientos, lo que reflejó

un comportamiento similar al observado con los quistes. No obstante, se observaron variaciones en función del mes en que se recolectaron las muestras (Figura 3).

En el primer muestreo, se registraron 14 juveniles por g de suelo en el (TC) y 17 en el (TI). En el segundo muestreo, ambos tratamientos mostraron una disminución en la cantidad de larvas, con 8 en el (TC) y 10 en el (TI). Sin embargo, en el tercer muestreo, se observó un aumento notable de juveniles en el (TI), con un total de 73, a diferencia con el (TC), que alcanzó 21 juveniles (Figura 3). Esta diferencia en el número de juveniles podría estar relacionada con el tratamiento integrado que incorporó la cepa INTA H4 del hongo *Trichoderma* sp., la cual pudo ejercer algún control sobre la población de juveniles.

El aumento en la cantidad de juveniles de *G. pallida* podría asociarse con diversos factores. Los exudados radicales liberados por las raíces de la planta, que incluyen el glicoalcaloide solanina, inducen al nematodo a alimentarse y provocan cambios fisiológicos en el quiste que promueven su eclosión. Además, estos exudados radicales son estimulantes que influyen en el comportamiento del nematodo (Cañón y Sanabria 2017). Otros factores ambientales, como la temperatura

y la humedad del suelo, también pueden desempeñar un papel crucial en el desarrollo y eclosión de estos juveniles.

Sobre este tema, Robertson y Bello (2009), indican que la solanina desempeña un papel crucial en la eclosión y desarrollo del nematodo, ya que afecta la estructura de las glándulas esofágicas y modula la expresión genética, lo que le impide que pueda parasitar. Se ha encontrado que el aumento en el número de juveniles de *G. pallida* está vinculado tanto al desarrollo fenológico del cultivo como a las condiciones ambientales durante el estudio (Piedra, 2012). Esta relación sugiere que el manejo agronómico debe considerar el ciclo de vida del nematodo y las etapas de crecimiento de la papa para optimizar las estrategias de control.

Con respecto al cuarto muestreo, ambos tratamientos mostraron cantidades semejantes de juveniles, con 84 en el (TC) y 81 en el (TI). Al llegar al quinto muestreo, se observó una reducción en la cantidad de juveniles para ambos tratamientos, con 41 en el (TC) y 22 en el (TI). En el último muestreo, tanto el (TC) como el (TI) presentaron cifras similares de juveniles, con 42 en el (TC) y 25 en el (TI). Estos resultados podrían estar influenciados por factores ambientales, como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de nutrientes, que pueden afectar la actividad y el desarrollo de estos nematodos (Piedra, 2012).

Numerosos estudios indican que *Trichoderma* no solo disminuye la incidencia y reproducción de *G. pallida*, sino que también ofrece protección en la rizosfera sin los impactos contaminantes de sustancias químicas en el suelo (Bustillo, 2008; Sharon et al., 2001; Dandurand & Knudsen 2016; Contina et al., 2017). Investigaciones realizadas por Verma et al. (2007) destacan que este hongo podría tener beneficios adicionales relacionados a su capacidad para degradar agroquímicos como endosulfan y pentaclorofenol debido a la producción de enzimas como hidrolasas, peroxidasas, lacasas y enzimas líticas.

Se utilizó la cepa INTA H4 de *Trichoderma* para evaluar su efecto nematicida, aprovechando tanto sus propiedades como agente de control

biológico así como su capacidad para mejorar la salud del suelo al reducir la dependencia de químicos. Este hongo es una herramienta esencial en el manejo integrado de plagas (MIP) debido a su capacidad para mejorar la estructura del suelo, facilitando interacciones dinámicas con diversos microorganismos. También desempeña un papel en la descomposición de la materia orgánica, lo que contribuye a convertir los nutrientes en formas más disponibles y absorbibles para las plantas (Ortuño et al., 2013). Además, Chiriboga et al. (2015) mencionan su capacidad para estimular el crecimiento mediante la producción de metabolitos como terpenos, terpenoides, fenoles y alcaloides que promueven procesos de desarrollo en las plantas.

En la zona donde se llevó a cabo el estudio, los productores suelen aplicar químicos en la siembra de manera tradicional (Ramírez-Muñoz et al., 2014). No obstante, esta práctica no tendría un impacto significativo en el nematodo, ya que en ese momento los juveniles aún no han eclosionado de los quistes y las plantas de papa se encuentran en una fase de brotación. Durante este período transformación, el sistema radicular de la planta no está completamente formado, lo que limita la producción de exudados radicales en función del estado fenológico del cultivo (Desgarennes et al., 2006).

De acuerdo con Piedra (2012) la aplicación de un nematicida al comienzo de la siembra no afecta a los juveniles, ya que este tipo de producto no puede ingresar al quiste. Además, esta práctica podría disminuir la cantidad y efectividad de microorganismos beneficiosos en el suelo. Por otro lado, la composición mayoritaria de quitina y la resistencia del quiste impiden que sea penetrado o degradado por algún producto químico (Stirling, 1991). El quiste funciona como una capa protectora que resguarda los huevos y juveniles que se encuentran en su interior, lo que hace que la entrada efectiva del nematicida sea prácticamente imposible (Talavera, 2003).

Algunos productos químicos pertenecientes al grupo de los carbamatos que se emplean para combatir a *Globodera* actúan de manera sistémica en el cultivo. Sin embargo, los daños que este nematodo ocasiona al sistema

radicular impiden que el nematicida sea absorbido de manera eficaz por la planta. Según Arteaga (2018), la presencia de daños en el sistema radicular dificulta la absorción eficaz de nematicidas, lo que se traduce en la necesidad de realizar múltiples aplicaciones para un control efectivo.

Esta situación conlleva problemas relacionados con la persistencia del efecto debido a la continua aplicación de un único grupo de nematicidas, además de estar vinculada a una alta dinámica del producto químico en el suelo. Esta movilidad tiene un impacto negativo en las cadenas tróficas del suelo (Haydock *et al.*, 2006) y genera gastos económicos adicionales para los agricultores.

En Costa Rica, Piedra (2012) determinó los umbrales de daño causado por *G. pallida* en la variedad Floresta, los cuales se utilizaron en esta investigación. Este estudio estableció que a partir de trece juveniles y huevos por gramo de suelo, comienzan a manifestarse daños en las plantas. En el presente estudio, ambos tratamientos superaron este umbral, con valores máximos de 130 juveniles por g de suelo en el manejo convencional y 100 juveniles por g de suelo en el manejo integrado. Estas densidades poblacionales elevadas pueden reducir los rendimientos del cultivo en hasta un 80 %, aumentar los costos de producción, disminuir la calidad y el peso de los tubérculos. Además, un aumento significativo en la cantidad de juveniles de este nematodo podría ocasionar retraso fisiológico y una reducción en el sistema radicular de las plantas de papa (Vignola *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

Esta investigación evidencia que las altas densidades poblacionales de *G. pallida* en el cultivo de papa superó los umbrales críticos que causan daños significativos, lo que resalta la necesidad de un monitoreo regular y de implementar medidas de manejo integradas para mitigar su efecto negativo en la producción de este tubérculo.

El manejo integrado de *G. pallida* no superó al convencional en reducir la población de quistes. La densidad de nematodos varió según el desarrollo del cultivo, lo que demuestra la importancia de considerar este factor en estrategias de control.

Aunque sin resultados estadísticamente significativos, *Trichoderma* muestra potencial como control biológico y merece mayor estudio. Las prácticas actuales resultaron insuficientes, por lo que se requiere mayor investigación para optimizar el manejo de esta plaga.

Realizar muestreos regulares es fundamental para monitorear la actividad de la plaga y analizar la viabilidad de quistes, juveniles y huevos por gramo de suelo. Un diagnóstico preciso no solo mejora la producción y los rendimientos, sino que también reduce las poblaciones de nematodos y los costos asociados, además de facilitar la mejor estrategia de control para esta plaga.

LITERATURA CITADA

- Andrés, M.F. (2002). Estrategias en el control y manejo de nematodos fitoparásitos. Ciencia y Medio Ambiente – CCMA-CSIC. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/128310/1/Estrategias %20en %20el %20control392\(M %C2 %AAF %20Andr %C3 %A9s\).pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/128310/1/Estrategias%20en%20el%20control392(M%20C2%20AAF%20Andr%C3%A9s).pdf)
- Arteaga, B. (2018). *Determinación del potencial nematocida y nematostático in vitro de Pleurotus ostreatus (Agaricales: Pleurotaceae) sobre larvas J₂ de Globodera pallida (Tylenchida: Heteroderidae)*. [Tesis Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Ecuador. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/14678>
- Barría, J. (2010). *Información general, introducción y control sobre la acción del Cinara cupressi y Globodera pallida en la región de Magallanes*. [Tesis de grado, Universidad de Magallanes], Chile. http://www.bibliotecadigital.umag.cl/bitstream/handle/20.500.11893/275/barria_vargas_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bustillo, A. (2008). El Manejo Integrado de los Cultivos en relación con el control de Plagas. En A. Bustillo, Los insectos y su manejo en la cultura colombiana. Chinchiná (Colombia). Cenicafé. 466 p.
- Cañón, R.D., & Sanabria, R.S.C. (2017). Evaluación de la acción de los hongos *Paecilomyces lilacinus*, *Trichoderma harzianum* y *Lecanicillium lecanii* sobre el nematodo *Globodera pallida* Stone (Behrens) en plantas de papa variedad criolla galeras. [Tesis de grado, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales]. Bogotá D.C., Colombia. <https://repositorio.udca.edu.co/handle/11158/764>
- Chiriboga, H., Gómez, G., & Garcés, K. (2015). *Protocolos para formulación y aplicación del Bio-Insumo: Trichoderma spp. para el control biológico de enfermedades*. IICA. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/2647>
- Contina, J., Dandurand, L., & Knudsen, G. (2017). Use of GFP-tagged *Trichoderma harzianum* as a tool to study the biological control of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Applied Soil Ecology*, 115:31-37. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.010>
- Coto, Á. (2005). *El Nematodo Blanco de la Papa (Globodera pallida Stone)*. MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). SFE (Servicio Fitosanitario del Estado). San José, Costa Rica. 7 p. <https://studylib.es/doc/6663153/el-nematodo-blanco-de-la-papa--globodera-pallida.stone->
- Dandurand, L., & Knudsen, G. (2016). Effect of the trap crop *Solanum sisymbriifolium* and two biocontrol fungi on reproduction of the potato cyst nematode, *Globodera pallida*. *Annals of Applied Biology*, 1-10. <https://doi.org/10.1111/aab.12295>
- Desgarennes, D., Carrión, G., Núñez-Sánchez A.E., & Núñez-Camargo, M.C. (2006). Distribution of stages and in vitro larval hatching in *Globodera rostochiensis* cysts. *Nematropica*, 36(2), 251-260.
- Ebrahimi, N., Viaene, N., Aerts, J., Debode, J. & Moens, M. (2016). Agricultural waste amendments improve inundation treatment of soil contaminated with potato cyst nematodes, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. *European Journal of Plant Pathology*, 145, 755-775. <https://doi.org/10.1007/s10658-016-0864-3>
- Fenwick, D.W. (1951). The effect of temperature on the development of potato root eelworm, *Heterodera rostochiensis*. *Annals of Applied Biology*, 38:615-617. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1951.tb07833.x>
- Franco, J., González, A., & Matos, A. (1993). Manejo Integrado del nematodo quiste de la papa. Lima Perú, Centro Internacional de la Papa. 172 p.
- García, A.C. (2006). Identificación de especies de nematodos fitopatógenos de los géneros *Globodera* spp. y *Meloidogyne* spp. por medio de dos técnicas moleculares. [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)]. Cartago, Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/459>
- Haydock, P.P.J., Woods, S.R., Grove, I.G., & Hare, MC. (2006). Chemical control of nematodes. In: Perry RN, Moens M (eds) Plant nematology. CABI, Wallingford, pp 392-410.

- Lord, J., Lazzeri, L., Atkinson, H., & Urwin, P. (2011). Biofumigation for control of pale potato cyst nematodes: Activity of brassica leaf extracts and green manures on *Globodera pallida* in vitro and in soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59:7882-7890. <https://doi.org/10.1021/jf200925k>
- Mai, W.F., Brodie, B.B., Harrison, M.B., & Jatala, P. (1980). Nematodo de la pudrición de la papa. Compendio de enfermedades de la papa. Centro Internacional de la papa. W. J. Hooper editor. pp. 131-134.
- Martínez, A.M. (2011). Densidad poblacional de quistes y larvas (*J₂*) *Globodera rostochiensis* en suelos cultivados con papa en el paisano municipio de las vigas de Ramírez. [Tesis de grado. Universidad Veracruzana. Xalapa], México. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/677856?show=full>
- Ochola, J., Cortada, L., Ng'ang'a, M., Hassanali, A., Coyne, D., & Torto, B. (2020). Mediation of Potato–Potato Cyst Nematode, *G. rostochiensis* Interaction by Specific Root Exudate Compounds. *Frontiers in Plant Science* 11:649. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00649>
- Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). (2015). Ficha técnica nematodo dorado *Globodera rostochiensis*. (Wollenweber, 1923) (Skarbilovich, 1959). [https://www.oirsa.org/contenido/documentos/FICHA %20TECNICA %20NEMATODO %20DORADO.pdf](https://www.oirsa.org/contenido/documentos/FICHA%20TECNICA%20NEMATODO%20DORADO.pdf)
- Ortuño, N., Miranda, C., & Claros, M. (2013). Selección de cepas de *Trichoderma* spp. generadoras de metabolitos secundarios de interés para su uso como promotor de crecimiento en plantas cultivadas. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 1(1):16-32. http://www.scielo.org.bo/pdf/jsab/v1n1/v1n1_a03.pdf
- Piedra, R. (2012). Elementos para el diseño de un manejo integrado del nematodo fitoparásito *Globodera pallida* (Stone) en el cultivo de papa. [Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Costa Rica]. Heredia, Costa Rica. 146 p. <https://docinade.ac.cr/wp-content/uploads/2020/11/Ricardo-Piedra-NaranjoSPA.pdf>
- Piedra-Naranjo, R., Obregón-Gómez, M., Vargas-Chacón, C., Avilés-Chaves, J., & Meckbel-Campos, J. (2008). Identificación de razas del nematodo de quiste de papa (*Globodera pallida* (Stone)) con diferenciales o clones de papa. *Alcances Tecnológicos*, 6(1), 73-80.
- Quesada, R. (2007). Los Bosques de Costa Rica. IX Congreso Nacional de Ciencias. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica, 16 p.
- Ramírez-Muñoz, F., Fournier-Leiva, M., Ruepert, C., & Hidalgo-Ardón, C. (2014). Uso de agroquímicos en el cultivo de papa en Pacayas, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 25:337-345. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v25n2/a11v25n2.pdf>
- Rivera, S.W.I. (2009). Evaluación de la Resistencia y/o Tolerancia de 24 Variedades de Papa Nativas al Parasitismo del Nematodo del Quiste de la papa (*Globodera pallida*) en Invernadero Cutuglahua-Pichincha. [Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana], Quito, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6767>
- Robertson, L., & Bello, A. (2009). *Globodera rostochiensis* y *G. pallida*. Sociedad Española de Fitopatología. Boletín informativo N°68-2009. 33 p. http://sef.es/sites/default/files/publications/BoletinNum68_0.pdf
- Rosende, O., García Calvo, L., & Sobrino Caballero, C. (2003). Nematodos del género *Globodera* y alternativas de control en Galicia. Boletín de sanidad vegetal. *Plagas*, 29(1), 63-69.
- Schapovaloff, M.E., Angeli-Alves, L.F., Urrutia, M.I., & López-Lastra, C.C. (2015). Ocurrencia natural de hongos entomopatógenos en suelos cultivados con yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) en Misiones, Argentina. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(2), 138-142. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.03.005>
- Servicio Fitosanitario del Estado (SFE). (2015). Guía Técnica Nematodo Blanco del Quiste de la Papa (*Globodera pallida* Stone). <https://xdoc.mx/preview/globodera-pallida-stone-5fe17fac1501e>
- Sharon, E., Bar-Eyal, I., Chet, L., Herrera, A., Kleifeld, O., & Spiegel, Y. (2001). Biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* by *Trichoderma harzianum*. *Phytopathology*, 91:687-693. 10.1094/PHYTO.2001.91.7.687

- Silva, C. (2018). Biofumigación con brassicaceas para el control de nematodos en el cultivo de papa. [Tesis de grado. Universidad Técnica de Ambato], Cevallos, Ecuador. 70 p. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28114>
- Smith, I.M., McNamara, D.G., Scott, P.R., & Holderness, M. (1997). *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida* Data Sheets on Quarantine Pest. Pp. 601-606. En: Quarantine Pest for Europe. Second edition. CAB International & EPPO. UK 1425 p.
- Stirling, G.R. (1991). Biological control of plant-parasitic nematodes. Wallingford, UK, CAB International. 282 pp.
- Sullivan, M.J., Inserra, R.N., Franco, J., Moreno Leheudé, I., & Greco, N. (2007). Nematodos quiste de la papa: sus hospedantes e impacto regulatorio. *Nematropica*, 37(2), 193-202.
- Talavera, R. (2003). Manual de Nematología Agrícola. *Introducción al análisis y al control nematológico para agricultores y técnicos de agrupaciones de defensa vegetal. Instituto de formación agraria y pesquera*. Brasil. 23 p.
- Tencio, R. (2013). Información General de la Región Central Oriental. Ministerio de Agricultura. Región Central Oriental. 14 p. [http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Informacion %20General %20Region %20CentralOriental %202013.pdf](http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Informacion%20General%20Region%20CentralOriental%202013.pdf)
- Termorshuizen, A., Korthals, G., Thoden, T. (2011). Organic amendments and their influences on plant-parasitic and free-living nematodes: a promising method for nematode management?. *Nematology*, 13:133-153. <https://doi.org/10.1163/138855410X541834>
- Vázquez, J., Álvarez-Vera, M., Iglesias-Abad, S., & Castillo, J. (2020). La incorporación de enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost reduce los efectos negativos del monocultivo en suelos. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 105-112. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.12>
- Valencia-Serna, R.A., Guzmán-Piedrahita, Ó.A., Villegas-Estrada, B., & Castaño-Zapata, J. (2014). Manejo integrado de nematodos fitoparásitos en almácigos de plátano dominico hartón (*Musa AAB* Simmonds). *Luna Azul*, (39):165-185.
- Verma, M., Brar, S.K., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y., & Valéro, J.R. (2007). Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: Panoply of biological control. *Biochemical Engineering Journal*, 37:1-20. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.05.012>
- Vilca, R.C. (2013). Evaluación de tres cultivos para su uso como plantas trampa del nematodo del quiste de la papa *Globodera* spp. en invernadero. [Tesis de grado. Universidad Nacional del Altiplano]. Puno, Perú. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3274602>
- Vignola, R., Watler, W., Vargas, A., & Morales, M. (2017). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de papa en Costa Rica. Ficha Técnica Cultivo de Papa. 78 p. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8214.pdf>

EFFECTO DE LA LLUVIA EN LA PRODUCCION DE ARROZ DE SECANO (*Oryza sativa*) EN PARRITA, COSTA RICA

Johnny Montenegro Ballesteros.¹

RESUMEN

Efecto de la lluvia en la producción de arroz de secano (*Oryza sativa*) en Parrita, Costa Rica. Con el propósito de determinar el efecto del clima durante el ciclo vegetativo del arroz de secano en su rendimiento productivo y determinar la relación entre la producción de arroz de secano con el fenómeno ENOS, se analizó información productiva y de lluvia desde 1980 y hasta el 2020 para la región de Parrita. Se realizó análisis de correlación entre la precipitación y productividad, también se clasificó la información climática en tres condiciones: lluviosa, normal y, seca; y según evento ENOS, las cuales se relacionaron con la productividad. No se determinó correlación entre la precipitación y productividad, y en el caso de la condición climática, existe tendencia a incrementarse la productividad cuando la condición climática es lluviosa. El evento ENOS parece influenciar los rendimientos ya que la productividad tiende a ser mayor durante la Niña. Es recomendable realizar este tipo de estudios para efectuar una mejor planificación de la siembra y manejo del cultivo en función del pronóstico climático de corto y mediano plazo.

Palabras clave: Vulnerabilidad climática, cultivos anuales, seguridad alimentaria, ENOS, clima

ABSTRACT

Effect of rainfall on rainfed rice (*Oryza sativa*) production in Parrita, Costa Rica. Correlation analysis was carried out between precipitation and productivity, the climatic information was also classified into three conditions: rainy, normal and dry; and according to the ENSO event, which were related to productivity. No correlation was determined between precipitation and productivity, and in the case of climatic condition, there is a tendency to increase productivity this is rainy. The ENSO event seems to influence yields since productivity tends to be higher during La Niña. It is advisable to carry out this type of studies to better planning of planting and crop management based on the short and medium term climate forecast.

Keywords: Climate vulnerability, annual crops, food security, ENSO, climate

¹ Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. E-mail: jmontenegro@inta.go.cr, jmontenegro@imn.ac.cr ORCID 0000-0001-8526-570X

INTRODUCCIÓN

El sector arrocerero costarricense tiene un rol muy importante en la producción de alimento para el país, y contribuye significativamente no solo en este aspecto, sino también con la seguridad socio-económica de un sector de la población al proporcionar esta actividad empleos directos e indirectos. De acuerdo con la Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ 2021) el sector productivo primario de este cultivo lo constituyeron aproximadamente 500 productores, de ellos más del 75 % tienen áreas menores a 50 ha y en conjunto producen menos del 20 % de la cosecha nacional.

En términos económicos, el valor de la producción bruta de la actividad arrocerera del 2019 fue de 52.946,5 millones de colones (SEPSA) 2020). En el 2020 la proporción del consumo nacional producido en el país fue de 41 % (CONARROZ 2021).

En este cultivo las diferentes variables climáticas (entre ellas precipitación pluvial, temperatura, luminosidad) ejercen gran influencia en su desarrollo, ya que afectan directamente los procesos fisiológicos de formación y llenado de grano y, en consecuencia, el nivel productivo (Jiménez 2021). Es por lo anterior que el rendimiento productivo depende, además del manejo técnico, de adecuadas condiciones climáticas.

Sin embargo, el comportamiento del clima ha comenzado a variar como resultado de la acumulación de gases con efecto invernadero en la atmósfera, que son los responsables del aumento de la temperatura ambiente y el cambio climático resultante. Ello influencia directamente la producción de los cultivos.

En este sentido, también se debe considerar el efecto que tiene la fase cálida de El Niño Oscilación del Sur (ENOS, el Niño) en el régimen de precipitación, y consecuentemente en la disponibilidad de agua en el suelo. Además, la frecuencia e intensidad de este fenómeno se ha visto alterado en los últimos años, ya que comparado con su comportamiento histórico, se ha determinado que el mismo se ha vuelto más recurrente (Instituto Meteorológico Nacional (IMN) 2015).

De acuerdo con Garcés y Medina (2018) el arroz de secano requiere alrededor de 1.000 mm de lluvia durante su desarrollo para lograr un adecuado rendimiento productivo, algo que debido a los cambios observados en el clima en los últimos años no siempre se presenta. La importancia del nivel de lluvia durante el ciclo de crecimiento del cultivo ha sido demostrada en diferentes investigaciones (Boonwichai et al. 2018, Pardo et al. 2020).

Estos cambios, la falta o exceso de lluvias, es atribuido al cambio climático, y según la opinión de los productores esta variación afecta directamente los rendimientos agrícolas de manera significativa. Trabajos realizados en otras latitudes demuestran esta tendencia (Goya 2021, López 2019, Pardo et al. 2020), y en la distribución espacial de las zonas aptas para cultivar (Contreras y Ñustez 2019).

En Costa Rica son escasos los trabajos de investigación enfocados en el efecto de las variables climáticas en los rendimientos históricos de los cultivos con excepción de los reportados para café, banano y frijol (Montenegro 2015, 2017, 2018), lo que limita el conocimiento de su vulnerabilidad al clima y, consecuentemente, disponer de una base técnica para desarrollar opciones de adaptación (Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), 2014).

En este sentido, estudios de vulnerabilidad de las actividades agropecuarias relacionadas a factores climáticos representan una oportunidad para planificar acciones a desarrollar en el corto y mediano plazo, que permitan la adaptación de los sistemas productivos a las nuevas condiciones climáticas. Esto también permitirá que los productores puedan continuar con sus actividades de manera que se mantenga la estabilidad social y económica de un sector muy importante de la población costarricense que contribuye con la economía y desarrollo del país.

Por lo anterior, esta investigación se realizó con los objetivos de: determinar el efecto de la lluvia durante el ciclo vegetativo del arroz de secano en su rendimiento productivo y, determinar la relación entre la producción de arroz de secano con el fenómeno ENOS en la región de Parrita.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

La investigación se realizó para el sistema de producción de arroz de secano para la región de Parrita, donde en los últimos años se ha sembrado el 54 % del total del área de este grano en el Pacífico Central, y representa alrededor del 7 % del área nacional (CONARROZ 2020).

En esta región el arroz se produce básicamente en lo que se conoce como primera siembra, la cual normalmente se realiza en mayo, y con una duración de 120 días de siembra a cosecha, la cual se efectúa en agosto. La siembra de arroz en la segunda época es mínima, según las estadísticas de la Corporación Arrocera Nacional reportadas en los informes anuales del 2010 al 2021

La región de Parrita, que se clasifica como Bosque Húmedo Tropical (Holdridge 2005) presenta temperatura y precipitación promedio anual de 27 °C y 3.487 mm, respectivamente (Retana et al. 2009), y predominan los suelos Entisoles y Andisoles (Mata 2017).

Desarrollo de la investigación

La presente investigación estuvo compuesta de dos fases. Durante la primera se procedió a la búsqueda de información estadística de área sembrada y producción de arroz de la región mencionada. Se logró tener acceso a información de ambas variables (producción y área sembrada) desde 1980 y hasta el 2020, la cual se obtuvo del Sistema de Información del Sector Agropecuario Costarricense (Infoagro 2022), así como de informes estadísticos de la Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021). Con esta información se calculó la productividad.

Debido a que no se dispone de estadísticas de siembra por época (primera o segunda) para la región de Parrita, y conociendo que más del 90 % de la siembra de arroz en el Pacífico Central se realiza en la primera (CONARROZ informes estadísticos anuales del 2010 al 2021), se asumió que los datos estadísticos accedidos son de la primera siembra.

De igual forma, se procedió a ubicar datos meteorológicos provenientes de estaciones meteorológicas de la región y para los mismos años (1980-2020) en los cuales se pudo acceder a la información antes reseñada.

Se logró obtener datos únicamente para la variable lluvia para el período señalado, ya que en el caso de la temperatura los registros están disponibles solamente a partir del 2009 de una estación ubicada en La Ligua de Parrita (9°30'46" N y 84°20'01" O, 6 m s. n. m.) la cual presentó datos incompletos de lluvia (faltaban meses aleatoriamente distribuidos).

Por lo anterior, se siguió el procedimiento normalmente utilizado por el Instituto Meteorológico Nacional, el cual consiste en rellenar la información faltante con la disponible en la estación meteorológica más cercana, lo cual se realizó con datos de la ubicada en el distrito de Damas (9°29'43" N y 84°12'53" O, 12 m s. n. m.), cantón de Quepos.

Una vez con la información anterior completa, en la segunda etapa se procedió a realizar los análisis que se detallan a continuación.

Análisis realizados

Lluvia vs rendimiento

Para determinar el efecto de la lluvia en los rendimientos productivos, se realizó un análisis de correlación entre la productividad y la variable climática lluvia para el periodo 1980-2020.

Condición climática

Para determinar el efecto de la condición climática en la producción, en primera instancia se definió este concepto, el cual se delimitó en función de la cantidad de lluvia total caída durante el ciclo de producción, desde la siembra hasta la cosecha, y para un ciclo de cultivo de 120 días.

De esta forma se establecieron tres condiciones climáticas: seca, lluviosa y, normal, los cuales totalizaron la lluvia recibida por el cultivo desde la siembra y hasta la cosecha.

Las condiciones seca y lluviosa correspondieron al percentil 20 superior e inferior de los datos ordenados por el volumen de lluvia acaecida durante el período de cultivo, y representaron las condiciones extremas en el período evaluado. Para la condición **normal** se asumió que la precipitación pluvial está comprendida en el percentil 60 intermedio entre las condiciones antes descritas.

El análisis estadístico de la productividad según condición climática (tratamientos) se realizó mediante un ANDEVA utilizando un diseño irrestricto al azar, y las medias comparadas con Tukey al nivel de $P < 0,05$ utilizando InfoStat (DiRienzo et al. 2018).

Productividad y el fenómeno del ENOS

Para este análisis se agrupó la productividad en tres categorías climáticas de acuerdo con el fenómeno ENOS: **Niña**, **Niño** y **Neutro**, según se presenta este fenómeno durante el ciclo completo del cultivo, es decir, que prevaleciera desde la siembra y hasta la cosecha.

Para realizar esta clasificación (agrupar el ciclo de cultivo por fenómeno del ENOS) se utilizó información generada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2022), la cual muestra el historial de estos eventos.

El total de la lluvia durante el ciclo de cultivo de arroz, y la respectiva productividad, se clasificó según la condición imperante del evento ENOS. A estos datos, se les realizó un Andeva utilizando un diseño irrestricto al azar con tres tratamientos (los eventos ENOS), y las diferencias de medias se compararon con Tukey ($P < 0,05$) para determinar diferencias en productividad entre eventos ENOS utilizando InfoStat (DiRienzo et al. 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lluvia vs rendimiento

No se determinó correlación ($P > 0,05$) entre la cantidad de lluvia caída durante el ciclo vegetativo del cultivo de arroz y la productividad para la zona de Parrita desde 1980 y hasta el 2020. En la figura 1 se puede observar de manera general, que no hay relación clara entre ambas variables. Se incluye correlación polinómica de tercer grado para demostrar lo anterior, la cual presenta un r^2 sumamente bajo.

La falta de correlación entre la lluvia y la productividad, cuando ambas variables son analizadas de manera agrupada para el set de datos disponibles, también ha sido reportada en otros trabajos de investigación realizados en Costa Rica (Montenegro 2017, Montenegro 2018). Esa situación puede llevar a conclusiones en las que se indique que no existe efecto alguno de la cantidad de lluvia sobre los rendimientos productivos, sin embargo, esta condición (falta de correlación) requiere de análisis más específicos de los datos, tal como se demuestra seguidamente.

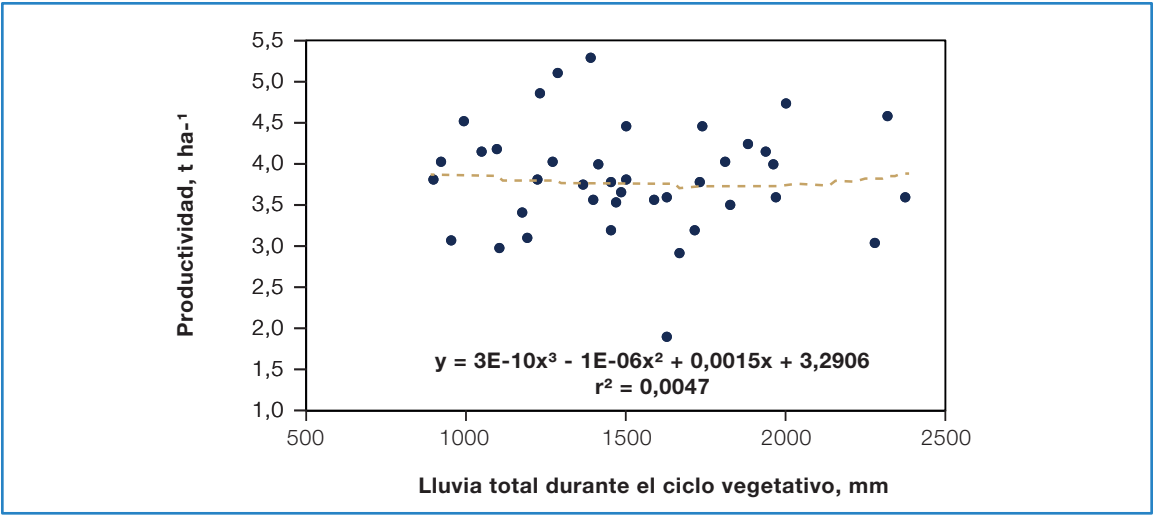


Figura 1. Relación entre productividad del cultivo de arroz de secano y lluvia en la región de Parrita. INTA. 2024.

Condición climática

La clasificación de la información de lluvia de acuerdo con la condición climática se puede observar en el cuadro 1. Los valores promedio de la lluvia caída durante el ciclo vegetativo del arroz se duplican cuando se pasa de una condición seca a lluviosa (Cuadro 1), mostrándose valores extremos muy contrastantes.

Cuadro 1. Cantidad de lluvia promedio en mm, caída durante el ciclo de cultivo del arroz de secano y rango de lluvia, según condición climática en la región de Parrita, Puntarenas

Condición climática	Lluvia promedio, mm ciclo ⁻¹ de cultivo	Rango, mm
Seca	1009	907 - 1109
Normal	1516	1184 - 1893
Lluviosa	2129	1946 - 2387

Con relación al rango de la lluvia que se presenta durante el ciclo de cultivo, este es relativamente variable bajo la condición normal, el cual mostró ser de aproximadamente 700 mm. En el caso de la condición seca o lluviosa, el rango fue más reducido (Cuadro 1).

El efecto de la condición climática en la productividad muestra que, si bien no se determinó significancia estadística ($P>0,05$), se puede observar que existe tendencia a lograrse mayores rendimientos durante la condición lluviosa con respecto a la seca (Fig. 2). La tendencia es lineal y positiva.

Estos resultados son congruentes con los reportados por Pardo et al. 2020 en Colombia y los de Boonwichai et al. 2018 en Tailandia, quienes

indicaron que la falta de lluvia es un factor que reduce los rendimientos del arroz de secano, algo que la tendencia observada en la figura 2 muestra claramente.

Un aspecto que podría influir en esta respuesta productiva es el hecho de que en promedio durante el ciclo de crecimiento del arroz se recibió al menos la cantidad indicada por Garcés y Medina (2018) para lograr un adecuado rendimiento productivo. De acuerdo con lo anterior, y tal como se muestra en el cuadro 1, aún en la época seca el cultivo recibió 1.000 mm de lluvia, el cual es lo mínimo requerido para obtener un rendimiento adecuado.

Valores promedio ± 1 error estándar

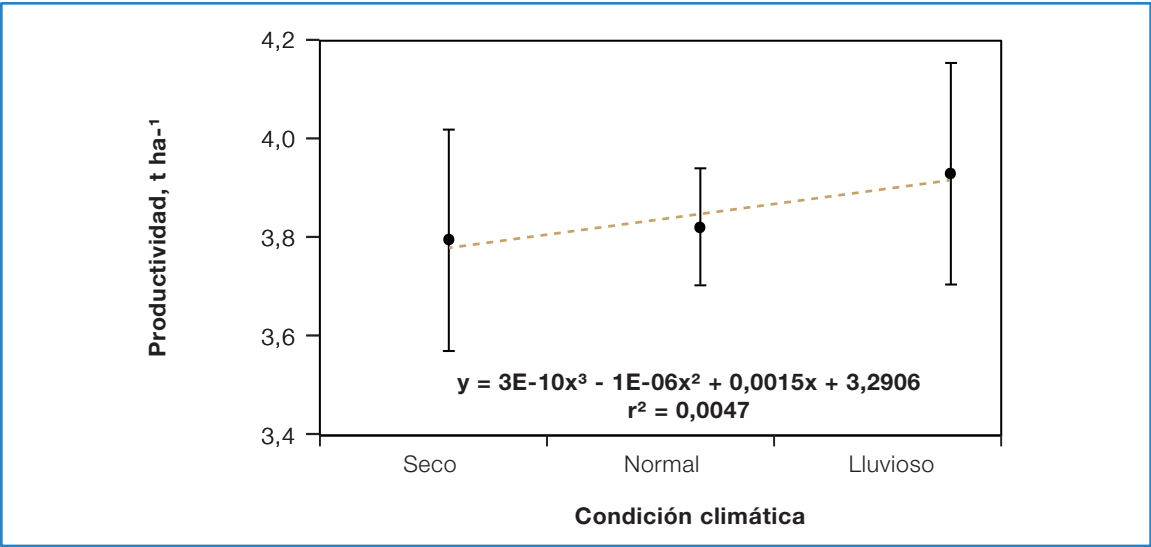


Figura 2. Productividad, t ha⁻¹, del cultivo de arroz de secano según condición climática en la región de Parrita. INTA. 2024.

Se debe hacer notar que los datos son bastante variables, lo cual lo muestran las barras que representan el error estándar, y que probablemente son el resultado de incluir de manera agrupada datos de todos los productores de arroz de la región de Parrita, los cuales p.e. con sus diferencias en el manejo y variedades contribuyen con la variabilidad observada.

Productividad y el fenómeno del ENOS

Se determinó diferencia marcada en la cantidad de lluvia que recibe el cultivo del arroz dependiendo del evento ENOS que impere durante el ciclo de cultivo (Cuadro 2), lo cual se manifiesta en el promedio de lluvia que recibió el cultivo en cada uno de los eventos.

Cuadro 2. Cantidad de lluvia promedio caída durante el ciclo de cultivo de arroz de secano y rango de lluvia en mm, según evento ENOS en la región de Parrita, Puntarenas

Evento ENOS	Lluvia promedio, mm ciclo ⁻¹ de cultivo	Rango, mm
Niño	1271	907 - 1832
Neutro	1585	931 – 2328
Niña	1755	1293 - 2387

Es interesante observar que los valores mínimos del rango de la condición de Niño y Neutro fueron similares (Cuadro 2), lo cual indica que en eventos Neutro es posible que se presentaron condiciones de muy poca lluvia como los observados durante el Niño. De igual manera, el rango superior de este evento muestra que es posible que la cantidad total de lluvia que se presenta en algunos eventos Neutros puede ser tan altos como los observados durante eventos Niña.

En el caso del evento de la Niña, todos los valores (promedio, mínimo y máximo) son superiores con respecto a los determinados con el Niño (Cuadro 2).

Con respecto al efecto de los eventos ENOS en la productividad, se determinó clara tendencia lineal positiva ($r^2=0,99$), donde se observa mayor productividad durante el evento de la Niña con respecto al Niño, mostrando la condición Neutra un nivel intermedio (Figura 3), sin diferir ($P>0,05$) con respecto al Niño o a la Niña.

Valores promedio ±1 error estándar

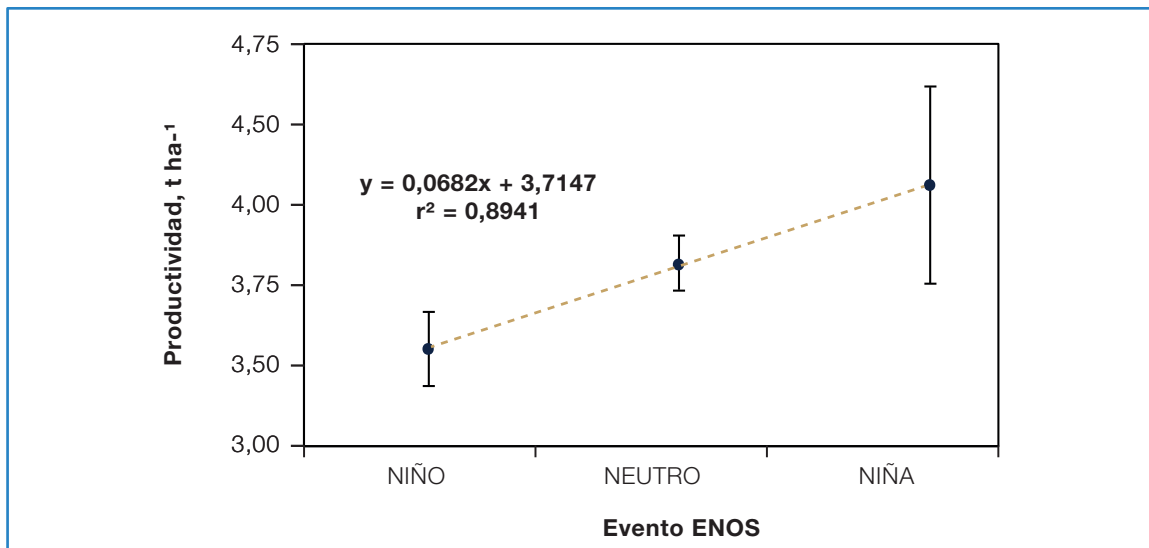


Figura 3. Productividad del cultivo de arroz de secano, t ha⁻¹, según evento del ENOS en la región de Parrita.

El anterior resultado es coincidente con lo señalado en diversas investigaciones (Boonwichai et al. 2018, Pardo et al. 2020) las cuales indican la importancia de las lluvias durante el ciclo de crecimiento del arroz para obtener mejores producciones de este grano.

De acuerdo con Barrios (2023) en la región central de Colombia, “El Niño” genera disminuciones notables en el rendimiento de arroz, lo cual es coincidente con la tendencia observada en la anterior figura. Similares resultados reportaron Villalobos (2001) cuando evaluó el impacto de El Niño en la producción de arroz en dos regiones agrícolas de Costa Rica. Reducción en el rendimiento de diversos cultivos en el área centroamericana causados por la reducción de las lluvias durante el evento de El Niño fueron reportados por Calvo et al. 2018, lo cual pone de manifiesto la importancia de las lluvias no solamente para el cultivo del arroz.

Nuevamente la variabilidad observada, especialmente en el evento de la Niña, explica parcialmente el motivo de la no determinación de diferencias significativa en la productividad con respecto al evento Neutro. En todo caso, es claro que los rendimientos productivos tienden a incrementarse durante los eventos Niña (Fig. 3)

Los análisis realizados muestran que cuando se manejan los datos generales de productividad y lluvia, no se logra determinar tendencia alguna, por lo que se requieren efectuar análisis más específicos como los elaborados (condición climática, fenómeno del ENOS) para poder obtener tendencias claras, ya que de lo contrario se podría llegar a conclusiones erróneas como que la lluvia no tiene efecto en la productividad del arroz de secano para la región donde se realizó este análisis.

De acuerdo con los datos accedidos y los análisis realizados, la condición climática (seca, normal o lluviosa) presenta una tendencia lineal positiva donde la productividad tiende a ser mayor cuando la condición es lluviosa, aunque la misma es de baja magnitud y no tiene efecto significativo en la productividad del cultivo del arroz.

En lo relacionado con los eventos ENOS, la señal es clara, ya que la productividad es mayor cuando el ciclo de cultivo ocurre durante la Niña, y los menores durante el Niño, lo cual demuestra claramente el efecto de la lluvia en los rendimientos que se obtienen en el cultivo de arroz de secano en la región de Parrita.

Es recomendable que se haga un esfuerzo tendiente a tener información estadística donde se consigne además de áreas, fechas de siembra, variedad y reporte de problemas fitosanitarios, el sistema de producción utilizado, y la producción alcanzada. De ser posible esta información debería estar a nivel de finca ya que eso permitiría mayor grado de detalle y en consecuencia, los análisis podrían indicar más claramente tendencias y relaciones. De esta manera sería posible dilucidar con certeza el efecto del clima en la producción.

Los resultados de este tipo de estudio pueden y deben ser utilizados para planificar la siembra y manejo del cultivo de acuerdo con el pronóstico climático de corto y mediano plazo para la región donde el mismo se realice. Ello permitiría planificar la siembra basados en la condición climática a imperar, de manera que la misma se pueda realizar cuando el pronóstico indique que van a prevalecer las condiciones climáticas que contribuyen positivamente a lograr mejores rendimientos productivos.

LITERATURA CITADA

Barrios Perez, C. (2023) El fenómeno de “El Niño” y los efectos en el mercado mundial del arroz. IPCC 2023 Report, Bogotá. 19 sl.

Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M., Weesakul, S., y Datta, A. (2018). Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 198(10),1157-1164.

Calvo-Solano, O., Quesada-Hernández, L., Hidalgo, H., y Gotlieb, Y. (2018). Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agron. Mesoam.* 29(3), 695-709. doi:10.15517/ma.v29i3.30828

Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ). (2021). Informe anual estadístico 2020/2021. San José, Costa Rica, 45 p.

----- (2020). Informe anual estadístico 2019/2020. San José, Costa Rica, 45 p.

----- (2019). Informe anual estadístico 2018/2019. San José, Costa Rica, 65 p.

----- (2018). Informe anual estadístico 2017/2018. San José, Costa Rica, 63 p.

----- (2017). Informe anual estadístico 2016/2017. San José, Costa Rica, 60 p.

----- (2016). Informe anual estadístico 2015/2016. San José, Costa Rica, 60 p.

----- (2015). Informe anual estadístico 2014/2015. San José, Costa Rica, 61 p.

----- (2014). Informe anual estadístico 2013/2014. San José, Costa Rica, 59 p.

----- (2013). Informe anual estadístico 2012/2013. San José, Costa Rica, 62 p.

----- (2012). Informe anual estadístico 2011/2012. San José, Costa Rica, 65 p.

----- (2011). Informe anual estadístico 2010/2011. San José, Costa Rica, 61 p.

Contreras, J., y Ñustez, K. (2019). Áreas de cambio de aptitud edafoclimática de cultivos con mayor amenaza frente al cambio climático en el Departamento del Tolima. Tesis de pregrado. Universidad de Manizales, Colombia. 60 p.

DiRienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. (2018). InfoStat versión 2018, Grupo InfoStat, FCA. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Garcés, G., y Medina, J. (2018). Fisiología del cultivo del arroz. Cartilla. Fedearroz-Fondo Nacional de Arroz, p. 6-19.

Goya, H. (2021). Incidencia del cambio climático en la producción de arroz en la zona costera del Ecuador, periodo 2009 – 2019. Tesis de Maestría. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador. 110 p.

Holdridge, L. (2005). Mapa de zonas de vida: <http://www.cct.or.cr/mapas/zonas-de-vida-costa-rica.pdf>.

Infoagro (2022). Estadísticas agropecuarias: <http://www.infoagro.go.cr/EstadisticasAgropecuarias/Paginas/default.aspx>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2022). El fenómeno ENOS. Accesado Febrero 17, 2022, <http://www.imn.ac.cr/educacion/enos.html>

Jiménez, B. (2021). Importancia de los factores climáticos en el cultivo del arroz. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 6(1), 28-34.

López, L. (2019). Efecto del cambio climático sobre la producción de arroz en los últimos 20 años en la Provincia Moyobamba región San Martín. Tesis Ing. Ambiental, Universidad Nacional San Martín-Tarapoto, Perú. 82 p.

Mata, R. 2017. Mapa digital de suelos de Costa Rica. Accesado 17 agosto del 2022. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2016/08/04/cia-actualiza-mapa-digital-de-suelos-de-costa-rica.html>

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2014). Tercera Comunicación Nacional. Seguridad alimentaria y el cambio climático en Costa Rica: granos básicos. San José, Costa Rica, MINAE, IMN, GEF, PNUD, 96 p.

Montenegro, J. (2018). La variabilidad climática y su influencia en la producción de café: Estudio de caso. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 13, 5-13.

----- (2017). Influencia de factores climáticos en la producción de banano: Estudio de caso. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 16, 5-14.

----- (2015). Influencia de factores climáticos en la producción de frijol en Costa Rica: Estudio regional UPALA. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 14, 76-85.

Pardo, O., Torres, H., Torres-Rodríguez, G., y Trujillo-González, J. (2020). Impactos del cambio climático sobre los rendimientos del arroz (*Oriza sativa* L.) en la zona Llanos, Colombia. *AGLALA*, 11(2), 94-106.

Retana, J., Alvarado, L., Solano, J., Solera, M., Araya, C., Sanabria, N., Pacheco, R., Castro, V., y Calderón, F. (2009). Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. IMN-CRRH-MINAET-PNUD. San José, Costa Rica. 75 p.

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA). (2020). Boletín estadístico agropecuario. Serie cronológica 2016-2019. Edición No. 30. 141 p.

Villalobos Flores, R. (2001). Impacto del fenómeno "El Niño" sobre la producción de arroz y frijol en dos regiones agrícolas de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanog.*, 8(1), 19-25.

CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA DE CINCO CLONES DE RAMBUTÁN (*Nephelium lappaceum*) EN EL TRÓPICO HÚMEDO DE COSTA RICA

Jéssica Castillo Cruz¹

RESUMEN

Caracterización agronómica de cinco clones de rambután (*Nephelium lappaceum*) en el trópico húmedo de Costa Rica. Entre el 2017 y 2021, se realizó la caracterización de cinco clones asiáticos de rambután, en la Estación Experimental Los Diamantes en Guápiles, con el objetivo de estudiar sus principales características agronómicas. El diseño fue constituido por cinco tratamientos en bloques completos al azar con cinco repeticiones. Se evaluaron variables morfológicas como: porcentaje de prendimiento de injertos, forma y tamaño de la hoja, posición de la inflorescencia, diámetro del tronco (mm), así como precocidad. Además, se registraron variables climáticas que se relacionaron con las fases fenológicas del cultivo. Durante la etapa de injertación el material que presentó mayor prendimiento fue Rongrien (77,5 %), mientras que R162 fue el que mostró un menor porcentaje (24,1 %). La forma de la hoja de todos los clones fue elíptica con excepción de Rongrien, que fue ovoide; el ápice fue descrito como puntiagudo y la base de la hoja acunada. El material R162, presentó diferencias para la variable largo (15,50 – 15,94 cm) ($p=0,001$) y diámetro de hoja (6,88 cm) ($p=0,0052$). El clon R134, fue el primero en llegar a floración (282 días) y Jeetle, el que más tiempo requirió (303 días). La posición de la inflorescencia fue terminal y axilar en todos los materiales. El clon R134 mostró menos afectación por alternancia en la producción, mientras que el Jeetle se vio más afectado por este comportamiento. Finalmente, períodos de estrés hídrico de 10 a 18 días, más una temperatura mínima de 16,55 °C, fue la condición necesaria para que se produjera diferenciación floral durante el periodo 2019.

Palabras clave: Sapindáceas, materiales asiáticos, atributos, fenología, variables climáticas.

Keywords: Sapindaceae, asian materials, attributes, phenology, climatic variables

INTRODUCCIÓN

El rambután es un árbol frutal de la familia Sapindaceae, a la que pertenecen otros frutos de interés comercial como el lichi (*Litchi chinensis* Sonn), el longan (*Dimocarpus longan* Lour) y el pulasán (*Nephelium mutabile*). Es originario del archipiélago Malayo, cultivado y distribuido en Tailandia, Vietnam, Filipinas, Sri Lanka, India, Australia, México, Brasil, Colombia, Guatemala, Honduras y Costa Rica. Se consume

¹ Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA, CR. jcastillo@inta.go.cr. <https://orcid.org/0009-0006-7967-8077>

principalmente como fruta fresca, sin embargo, también se procesa en conservas, compotas o pulpas (Sacramento & Andrade, 2014).

Conocido en el país como “mamón chino”, crece en zonas de los trópicos húmedos. Para la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA, 2012), este cultivo es estrictamente tropical en sus requerimientos climáticos y puede ser cultivado entre las latitudes 18° Norte y 18° Sur del Ecuador. Se desarrolla mejor en zonas cálidas, con altas precipitaciones, en altitudes, entre 0 a 800 m. Las precipitaciones deben estar entre 2000 a 4000 mm anuales bien distribuidos.

En Costa Rica, producto del trabajo de la Coalición Costarricense de Iniciativas de Desarrollo (CINDE) y el Proyecto de Apoyo Técnico a las Industrias de Exportación (PROEXAG II), ingresaron en 1993, plantas injertadas de rambután (R134, R162, R167, Jeetle) y en 1995 Rongrien (Vargas, 2003). El Banco de Germoplasma, se estableció en el Centro de Investigaciones de la Corporación Bananera Nacional (CORBANA), ubicado en La Rita de Pococí, Limón.

Dichos clones, reconocidos a nivel internacional como las mejores variedades de rambután (Calvo et al., 2009); producto del mejoramiento en características de calidad de fruta, sabor, color, tamaño, forma, peso del fruto, sólidos solubles (°Bx), capacidad de desprendimiento del arilo y vida útil post cosecha (Arias & Calvo, 2014). En el 2000, CORBANA puso a disposición de los productores estos materiales; con una descripción morfológica de sus frutos.

La actividad involucra a más de 400 agricultores, la gran mayoría catalogados como pequeños productores (SEPSA, 2019). La región Huetar Atlántica registró alrededor de 140.9 ha sembradas de rambután, de acuerdo con lo publicado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2015). Los clones distribuidos en todo el país, están sin identificación y carecen de información técnica sobre su comportamiento. De manera que, con el propósito de estudiar las principales características agronómicas de cinco clones de rambután (*Nephelium lappaceum*) en el Trópico Húmedo de Costa Rica, se desarrolló esta actividad de investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se estableció en La Estación Experimental Los Diamantes (EELD), ubicada en Guápiles, Pococí, Limón. La cual corresponde a una zona de vida de Bosque Muy Húmedo Tropical, con una precipitación promedio anual de 4380 mm, temperatura mínima promedio de 24°C, máxima promedio de 29 °C y una altitud de 262 m.

El trabajo inició en etapa de vivero en el 2016, con la siembra de las semillas de los patrones, las cuales se obtuvieron de un árbol criollo. Se utilizaron camas para la germinación, que duró aproximadamente dos meses. Las plantas obtenidas se colocaron en bolsas plásticas para almácigo

(20x28 cm) con sustrato conformado por suelo de bosque y granza de arroz en una proporción de tres a uno, respectivamente.

Posteriormente entre marzo y julio del 2017, cada material se injertó con la técnica de púa o hendidura, que consiste en la inserción de una sección terminal de una rama (vareta) con varias yemas, en el correspondiente patrón (portainjerto) criollo, decapitado a los 30 cm aproximadamente (los árboles poseían una altura de 60 cm y un diámetro de 6-12 mm). El experimento en campo se estableció en julio del 2017 y los últimos datos se registraron en octubre del 2021.

Tratamientos y diseño experimental

Se utilizaron cinco clones asiáticos como tratamientos: R134, R162, R167, Jeetle y Rongrien. El diseño se constituyó de cinco tratamientos con cinco repeticiones, distribuidos en un Bloques Completos al Azar. Cada repetición se conformó de seis árboles (parcela total) de los cuales se evaluaron tres (parcela útil).

Los materiales se sembraron a una distancia de 5 m entre árbol x 6 m entre hileras. Se agregó una fila de árboles en cada margen para evitar efecto borde y mantener competencia perfecta entre ellos.

Manejo agronómico

Se realizó un manejo del cultivo con baja carga química. Para el control de arvenses se utilizó motoguadaña, no se aplicó herbicida, para mantener el suelo con cobertura. Se hizo fertilización sintética según recomendaciones técnicas de “El cultivo de rambután” (Arias & Calvo, 2014). Durante el tercer y cuarto año se aplicaron biofermentos foliares para pre y floración (calcio, magnesio, boro, fosforo y potasio). Se hicieron tres podas de formación durante el primer año, para dar la estructura a los árboles y los siguientes cuatro años, poda de mantenimiento una vez al año; además, poda sanitaria y de mantenimiento al momento de las cosechas. Las ramas cortadas y troceadas se colocaron en la gotera de los árboles y se aplicó microorganismos nativos o de montaña, en forma líquida a una dosis entre 4,5 – 9,0 litros por bomba de 18 litros, para promover la descomposición de la biomasa y por condiciones de previas en el suelo (11 tipos de patógenos presentes en el suelo). Para el manejo de plagas se utilizaron técnicas de control biológico por conservación, sin aplicación de insecticidas.

Variables y métodos de evaluación

Con base en los descriptores para la caracterización del rambután indicados por el International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI, 2003) bajo el nombre de Bioversity International actualmente, se midieron y registraron las siguientes variables:

- a. Etapa de vivero: se evaluó el porcentaje de prendimiento en cada clon (injertos exitosos/total injertados*100).
- b. Diámetro del tronco en campo: después de tres meses de establecido el estudio en el campo y sobre el injerto, se midió trimestralmente el diámetro (mm) del tronco con un pie de rey o vernier. La medición se realizó en la misma posición (hacia el norte) y los árboles se marcaron con pintura, para no variar la ubicación de la medida.
- c. En la hoja: se tomaron cuatro hojas de un árbol por repetición/clon, para un total de veinte unidades; se recolectaron de los brotes terminales ya lignificados, hojas abiertas y sanas de cada punto cardinal. Los datos se registraron durante dos años (2020 y 2021), una vez al año, durante el proceso de crecimiento vegetativo activo. Se midió el largo y el ancho (cm) en el centro de la hoja.

Se observaron y registraron las siguientes variables:

- i. Forma de la hoja: 1 ovoide, 2 elíptica, 3 lanceolada, otra (Figura 1A).
- ii. Forma del ápice de la hoja: 1 aguda, 2 puntiaguda, 3 obtusa, otro (Figura 1B).
- iii. Forma de la base de la hoja: 1 aguda, 2 cuneada, 3 obtusa, otro (Figura 1C).
- iv. Diámetro y largo de hoja (cm): estas variables se midieron con un vernier o pie de rey.

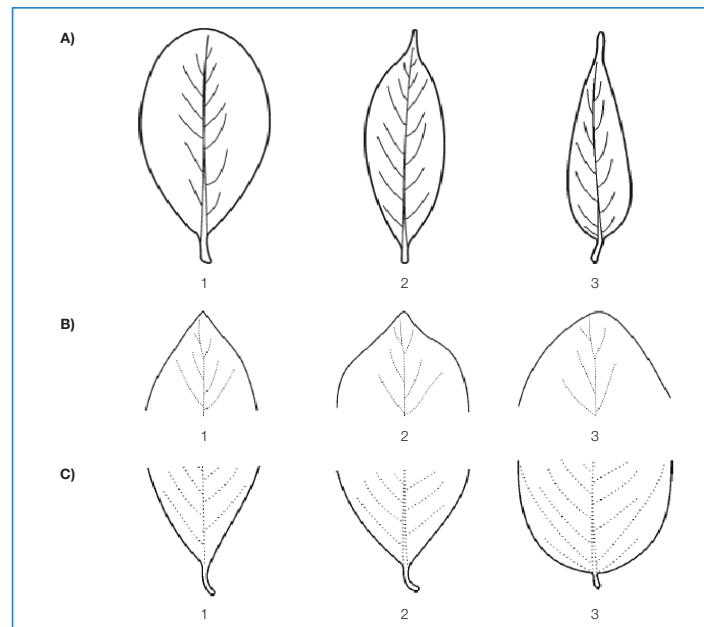


Figura 1. Diagramas para determinación de la forma de la hoja (A) ápice (B) base (C). 2021.

- a. En la inflorescencia: se registró en dos años productivos, cuatro observaciones por árbol de la unidad experimental.
 - i. Número de días entre la siembra y la primera floración.
 - ii. Número de días de floración a cosecha (madurez de consumo).
 - iii. Posición de la inflorescencia: Esta variable se clasificó como: 1 (terminal), 2 (axilar) o 3 (terminales y axilares juntas) (Figura 2). Se realizó una observación por punto cardinal.

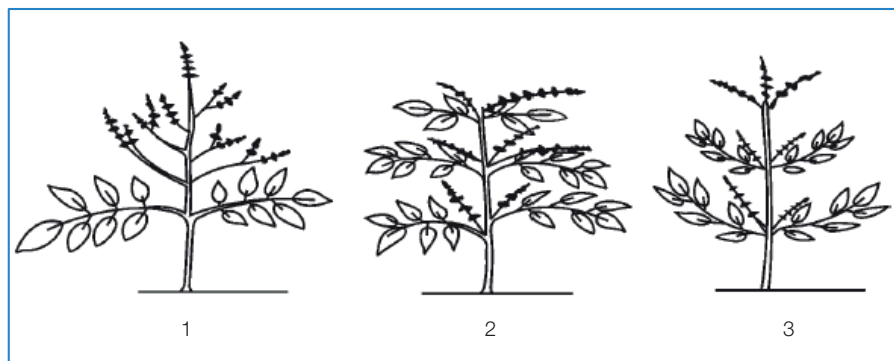


Figura 2. Tipos de posición de la inflorescencia en los árboles de rambután. 2021.

- b. En el fruto: en el momento fisiológico ideal para la cosecha (madurez de consumo, cambio en la coloración del pericarpio en al menos 90 % de la superficie), se seleccionó un árbol por clon por bloque. Además, se registró los árboles en producción.

- c.

Variables climáticas: Se registró y analizó la temperatura (grados Celsius) y la precipitación (mm) con los datos generados por la estación meteorológica (Davis) ubicada en EELD, durante el periodo de la investigación.
- d.

Análisis de los datos: se hizo análisis de varianza para las variables cuantitativas (diámetro de tronco, largo y diámetro de las hojas y floración). En los casos donde hubo diferencias se realizó la separación de medias con Duncan. Además, se hizo análisis de correlación por Pearson entre grosor de tronco, con temperaturas (promedio, mínima y máxima) y precipitación promedio. Se usó el programa estadístico Infostat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa de vivero

A los 15 días después del injerto, el porcentaje de prendimiento por clon osciló entre 24,1 y 77,5 % (Cuadro 1). El mayor porcentaje se obtuvo en el clon Rongrien (77,5 %) y el menor porcentaje lo presentó el clon R162 (24,1 %). Se tienen registros del 95 % de éxito en prendimiento de injertos bajo la técnica de parche, en los meses de enero y febrero en las condiciones climáticas de Chiapas, México (Castillo-Vera et al., 2017). Por otra parte, la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA., 2012) considera el injerto de aproximación como el más adecuado

para la propagación asexual del rambután, donde reportaron 90 % de prendimiento; sin embargo, ambos reportes no hacen referencia al tipo de materiales o clones de rambután que se caracterizaron en esta investigación. Cabe destacar que las varetas utilizadas para la injertación del R162 se obtuvieron de un único árbol (último miembro de la colección original) en condiciones desfavorables por sombra, poco mantenimiento y fertilización. Para Arias y Calvo (2014), las varetas utilizadas deben provenir de zonas intermedias del árbol con plena exposición al sol.

Cuadro 1. Árboles injertados de rambután y porcentaje de prendimiento a los 15 días después del injerto. Vivero, EELD. Marzo 2017.

Tratamientos	Total Injertados	Injertos exitosos	% Prendimiento
R 162	54	13	24,1
Jeetle	99	46	46,5
R 167	78	50	64,1
R 134	107	72	67,3
Rongrien	71	55	77,5

Diámetro del tronco

El valor del diámetro de los troncos presentó una tendencia lineal de crecimiento, durante los cuatro años de medición (2017-2021). Los árboles de Jeetle presentaron un incremento mayor durante los dos últimos años con un valor final de 119,55 mm (Figura 4). El diámetro del tronco de los árboles de rambután puede variar entre 40

a 60 cm (Low, 2019) en árboles en condición de “adultos” (después del octavo año).

Durante la segunda evaluación, el R162 mostró el mayor valor 18,83 mm diferente con respecto a los demás materiales ($p=0,0049$); mientras que en el tercer período de mediciones se presentaron

diferencias entre clones ($p=0,0010$). El R167 tuvo el menor diámetro registrado (18,78 mm) sin diferencias con Jeetle y Rongrien, pero diferente a R134 y R162 (mayor valor 25,14 mm). En el cuarto periodo, R167 y Jeetle, presentaron diferencias ($p=0,0426$) con los menores grosores (25,47 y

27,42 mm). A partir de ahí, no se presentaron diferencias significativas entre los materiales, para esta variable. Sin embargo, el clon Jeetle fue el que presentó el valor mayor de diámetro durante la mitad del periodo de evaluación de julio 2019 a octubre 2021 (Figura 3).

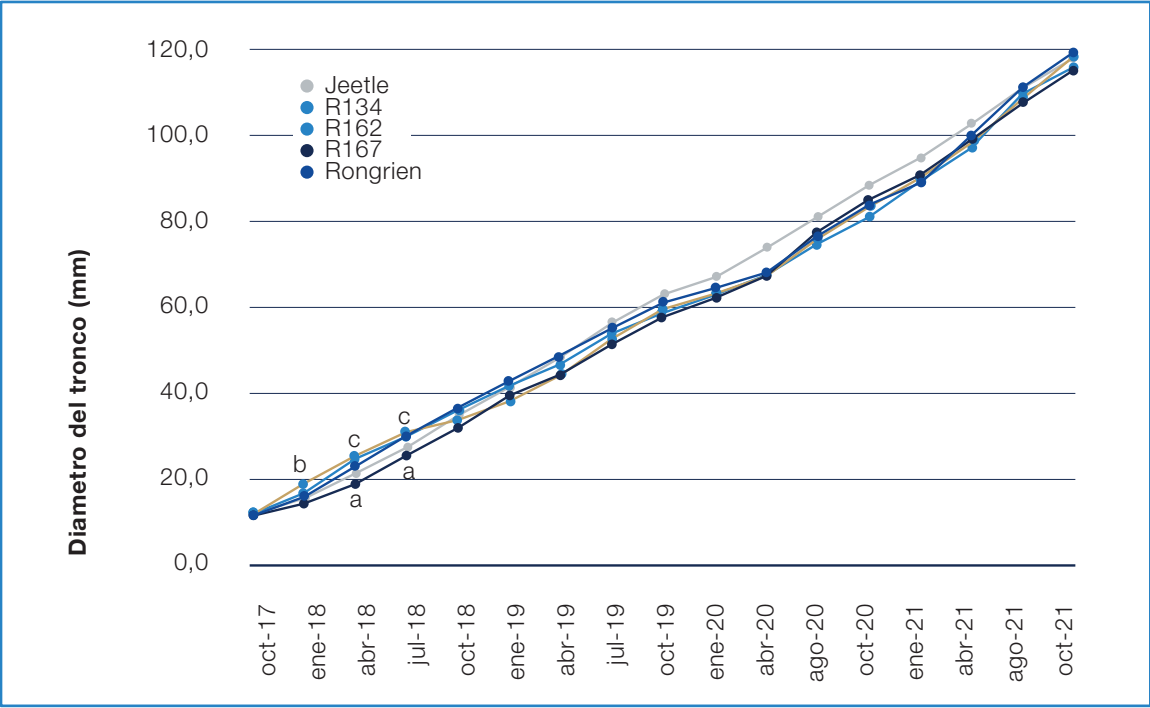


Figura 3. Diámetro del tronco (y) medido cada tres meses (x) en cinco clones de rambután. EELD, Pococí, 2021.

Morfología de la hoja

Todos los materiales estudiados mostraron similitud en la forma de la base y el ápice. Sólo el clon Rongrien se registró como ovoide, mientras que los demás mostraron forma elíptica (Cuadro 2).

Estos datos coinciden con lo descrito por Arias y Calvo (2014). Estas características se complementan con el color verde oscuro brillante en el haz, en estado de hoja madura (Figura 4).

Cuadro 2. Características morfológicas de las hojas en árboles de cinco clones de rambután.

Tratamientos	Forma	Ápice	Base
R 134	Elíptica	Puntiagudo	Cuneada
R 162	Elíptica	Puntiagudo	Cuneada
R 167	Elíptica	Puntiagudo	Cuneada
Jeetle	Elíptica	Puntiagudo	Cuneada
Rongrien	Ovoide	Puntiagudo	Cuneada

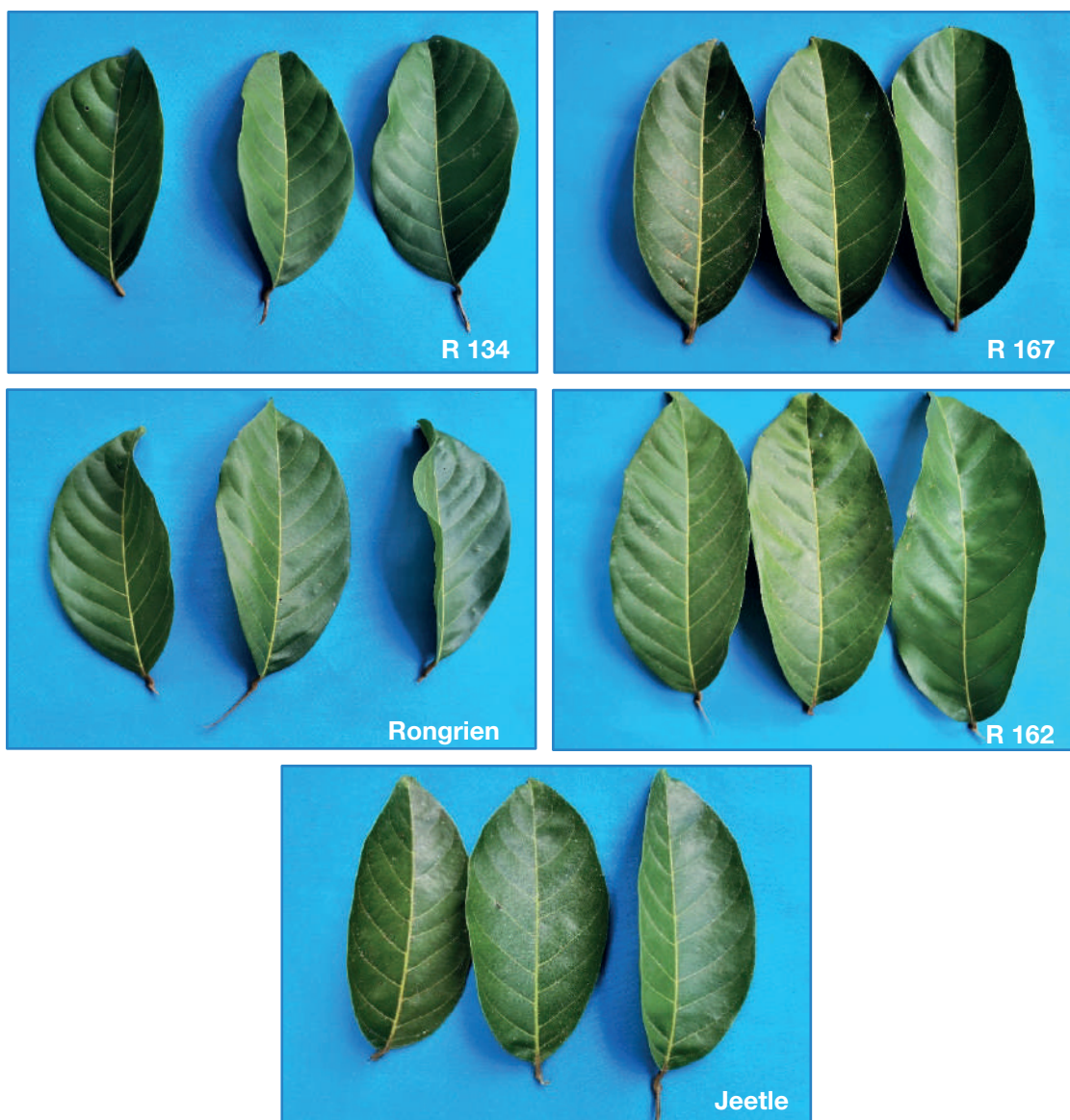


Figura 4. Características de forma de hojas maduras de los cinco clones de rambután. EELD, Pococí 2021.

Para el diámetro de hoja, durante el periodo 2020, el clon R162 registró un valor de 6,88 cm, el cual fue mayor y diferente ($p=0,0052$) con respecto a los datos presentados por los otros clones (Figura 5). En el año 2021, aunque no se presentaron diferencias ($p=0,1026$), el clon Jeetle presentó el menor diámetro, con $6,47 \pm 0,15$ cm y el clon R134 fue el de mayor valor

($6,95 \pm 0,15$ cm). Estas características de forma, ancho y longitud del foliolo; así como longitud del peciolo, se consideran como, las variables cuantitativas de mayor aporte en la divergencia genética, dentro del análisis de componentes principales en un estudio sobre la diversidad natural del rambután en India (Muhammed et al., 2019).

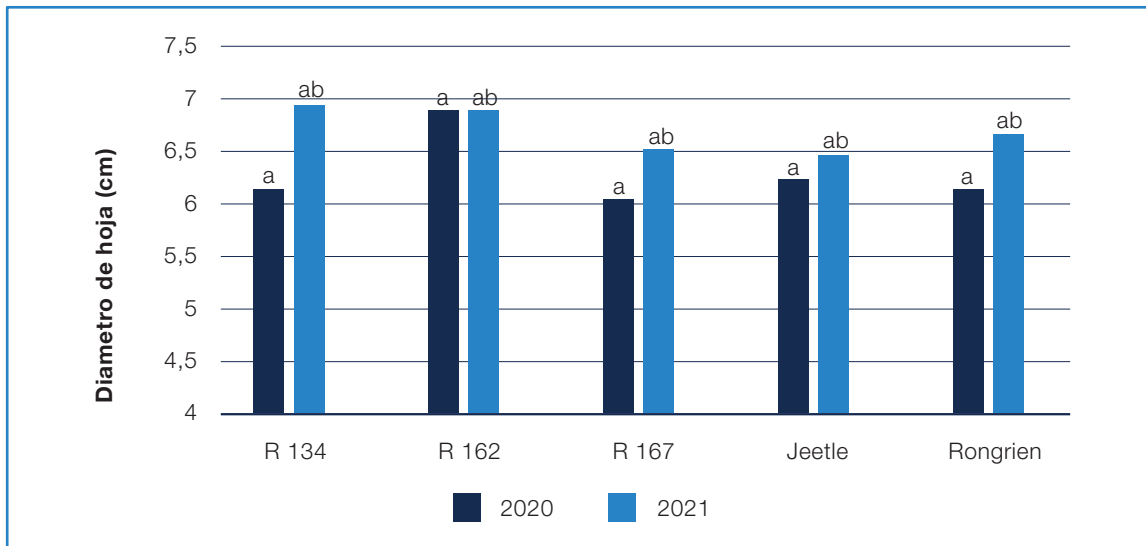


Figura 5. Diámetro de hoja de los clones de rambután. EELD, Pococí 2021.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En cuanto a la variable largo de la hoja (Figura 6) el clon R162, presentó la mayor longitud para ambos periodos de evaluación $15,94 \text{ cm} \pm 0,52$ y $15,50 \text{ cm} \pm 0,34$, diferente a los demás clones ($p=0,0001$). Mientras que el material R167 fue el de menor valor ($11,65 \pm 0,52 \text{ cm}$) en el 2020 y Rongrien ($12,27 \pm 0,35 \text{ cm}$) para el 2021. Estos valores concuerdan con los publicados por (Low, 2019) y Arias y Calvo (2014) para los mismos materiales.

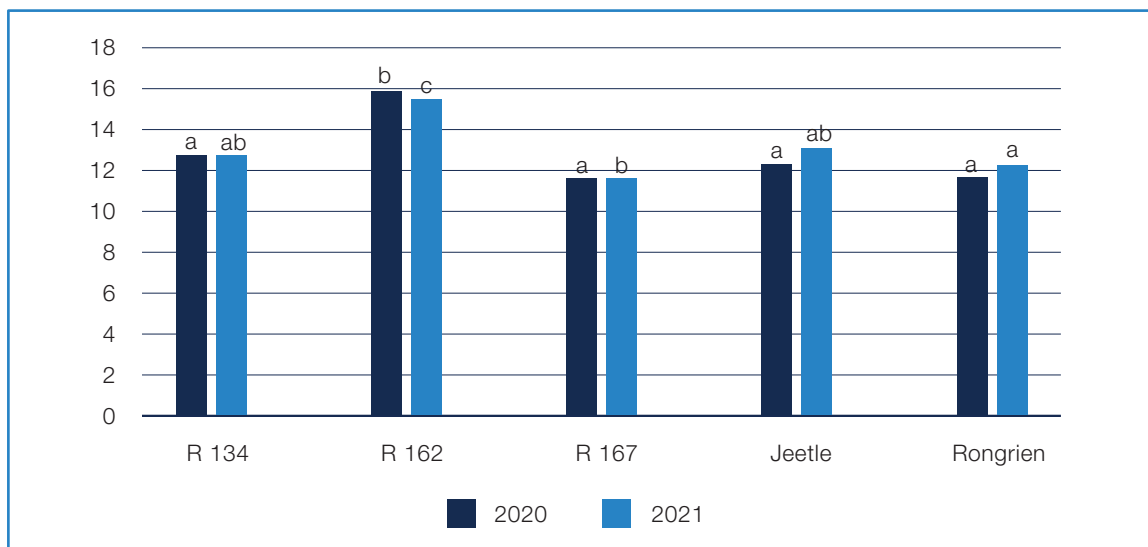


Figura 6. Largo de hoja de cinco clones de rambután. Pococí 2021.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

El material con menor tiempo entre la siembra y la primera floración fue el R134 con 282 días, mientras que Jeetle fue el que más tiempo tardó (303 días). Lo anterior sugiere de una respuesta diferente de esos clones a las variaciones de precipitación, temperatura, fotoperiodo y el almacenamiento de nutrientes. Además de las características antes mencionadas, autores (Reyes-Moreno et al., 2020) relacionan este comportamiento con la variabilidad genética propia de los materiales (Cuadro 3).

Cuadro 3. Días a floración de cinco materiales de Rambután. EELD, 2021.

Tratamientos	Días a Floración
R 134	282
R 162	288
R 167	288
Jeetle	303
Rongrien	294

Número de días de floración a cosecha.

Para el periodo 2019, el periodo de floración a cosecha (madurez de consumo) fue en promedio 147 días; mientras que para el 2020 fue de 140 días. Para esta variable, en Honduras se reporta valores de 120-126 días desde el inicio de la floración hasta la maduración (FHIA, 2012); en Colombia 140 días en promedio y en Malasia de 100-140 días (Arias Cruz et al., 2016). Las variaciones entre días son producto de variables climáticas (temperatura y humedad relativa) y

fisiológicas (Caballero-Pérez et al., 2011), debido a que la apertura y cuaje se producen en diferentes momentos en un mismo árbol, incluso en una misma panícula floral, según lo observado durante el estudio (Figura 7). En ese sentido, FHIA (2014), indica que las panículas florales no emergen todas de manera simultánea en un mismo árbol, sino que lo hacen de forma escalonada y transcurren aproximadamente de 30 a 45 días para que todas las panículas florales broten.



Figura 7. Inflorescencia de rambután con diferentes estadios de flor y fruto. EELD, 2021.

Posición de la Inflorescencia

La posición de la inflorescencia en el árbol mostró que el clon Rongrien registró casi un 70 % en ambas posiciones. Por otra parte, el material R162, fue el que presentó mayor cantidad de inflorescencias en posición terminal (Cuadro 4).

Cuadro 4. Posición de las inflorescencias en el árbol de rambután. EELD, 2021.

Material	Posición de la inflorescencia (%)		
	Terminal	Axilar	Ambas
R 134	38,5	0	61,5
R 162	40,0	5,0	55,0
R 167	35,3	5,9	58,8
Jeetle	37,5	0	62,5
Rongrien	30,4	0	69,6

La posición de la inflorescencia en procesos de mejoramiento genético está relacionada con factores de manejo de plantación (fitosanitarios, cosecha, poda), polinización, cuaje, entre otros. Para (Tripathi, 2021) las inflorescencias emergen de los brotes terminales, fisiológicamente aptos, sin embargo, algunas pueden salir de las axilas, y presentan menor tamaño y difieren en forma de las panículas terminales.

El fruto

Las principales características físicas y químicas de los frutos de rambután fueron evaluados y reportados por Saborío (2021). Según indicó, los clones Rongrien y Jeetle fueron considerados los de mejor calidad en cuanto a sabor; todos los materiales presentaron buen desprendimiento de pulpa en la semilla y los cinco clones mostraron color rojo en fruto (Figura 8).

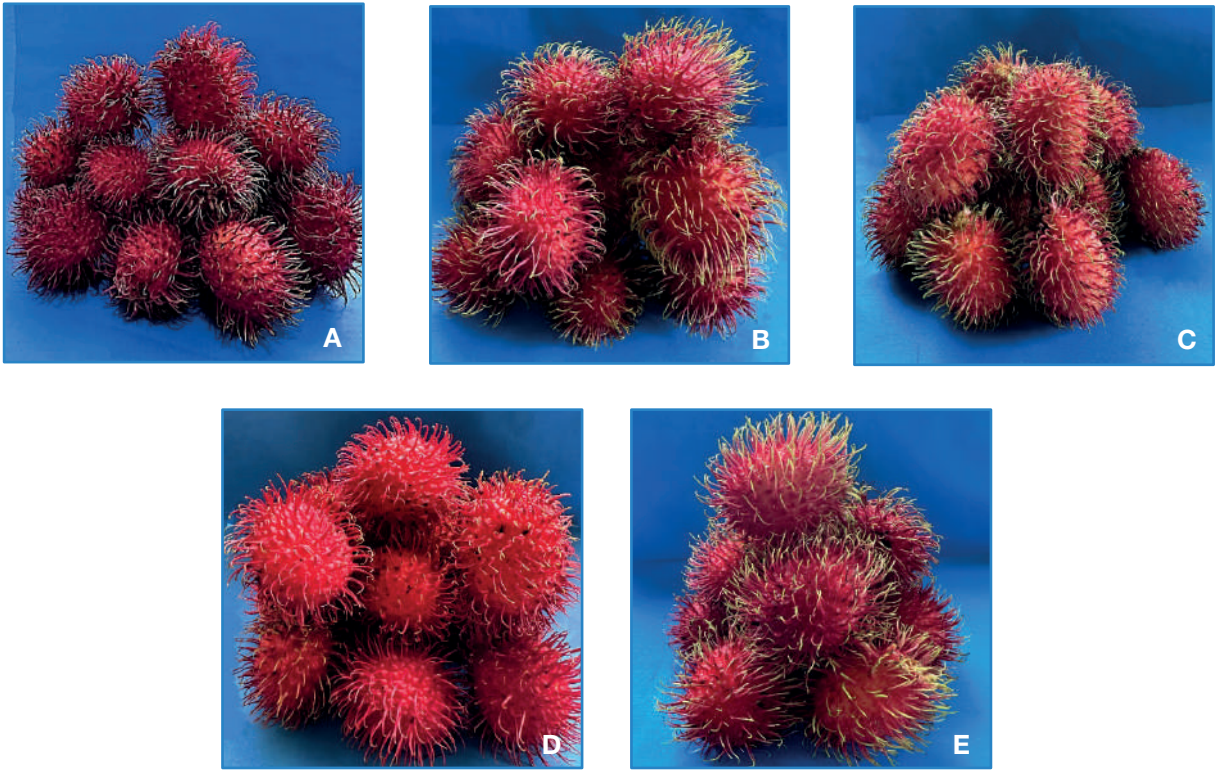


Figura 8. Frutos de rambután (A) Jeetle, (B) R134, (C) R162, (D) R167 y (E) Rongrien. EELD, 2021.

El cuadro 5, muestra árboles (unidad experimental) y el porcentaje que registró producción durante los dos primeros años de evaluación. El clon R 134, fue el que más cantidad de árboles en producción presentó para ambos períodos.

Cuadro 5. Número de árboles según clon en producción 2019 y 2020. EELD. 2021.

Tratamiento	2019	%	2020	%
	Número		Número	
R 134	2,20 n.s	73	3,00 c	100
R 162	1,40	47	2,80 c	93
R 167	1,80	60	1,80 ab	60
Jeetle	2,00	67	1,20 a	40
Rongrien	2,80	93	2,20 bc	73

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

No se presentaron diferencias entre materiales en el período 2019; mientras que, en el 2020, el clon R134 presento diferencias con respecto a Jeetle y R167 ($p=0,0027$). Por otra parte, los datos registrados corresponden a las dos primeras cosechas de los árboles, los cuales no han alcanzado su estabilidad productiva y no expresan su completo potencial. Por lo anterior, puede resultar prematuro emitir un criterio sobre el comportamiento productivo de los diferentes clones. No obstante, es importante recordar que otros factores como, nutrición, madurez de los brotes terminales, temperatura, lluvia y tipo de suelo, inciden directamente en la floración y producción de los árboles de rambután (Tripathi, 2021).

Relación entre temperatura y precipitación con fenología.

Las temperaturas mínimas (16,55-19,01 °C) fueron inferiores en los primeros meses de los años en estudio, mientras que los periodos de menos precipitación (1,95-11,83 mm) presentaron un patrón de años alternos entre enero y abril. Destacan algunas relaciones durante el periodo de la segunda floración (2020), el clon Jeetle presentó el mayor diámetro de tronco (74,03 mm) y contra-riamente menos cantidad de árboles en floración (Figura 9).

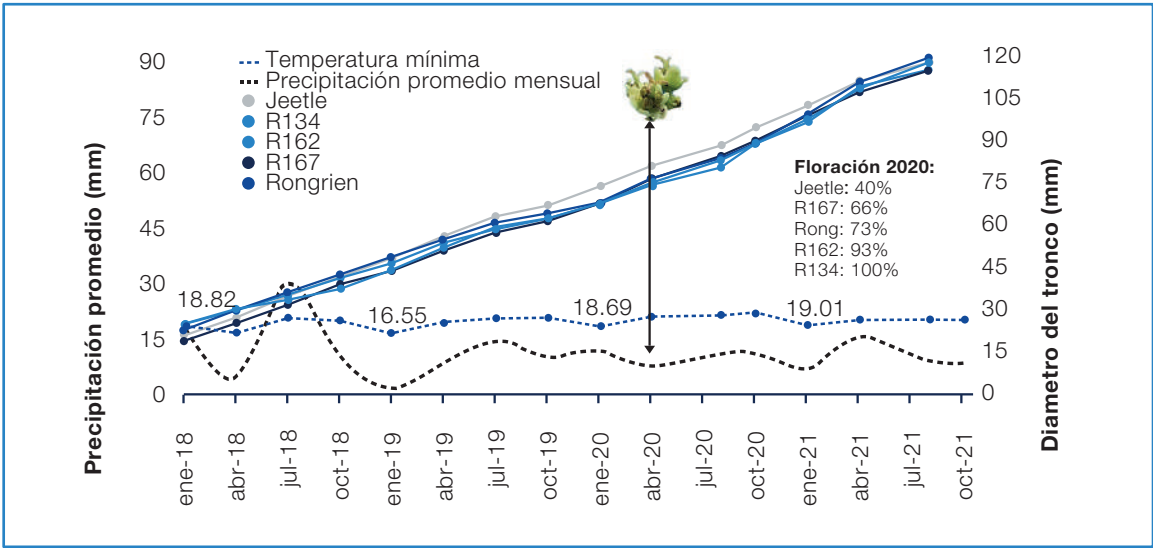


Figura 9. Relación de fenología con temperatura y precipitación en rambután. EELD 2021.

El material R134 presentó un 100 % de floración y el menor valor de diámetro de tronco (67,50 mm). Lo anterior evidencia una relación inversa entre el vigor de los árboles y la presencia de flores. También hubo una correlación (positiva y muy alta) del engrosamiento del tronco en Jeetle (Cuadro 6) y R167 con temperatura (media, máxima y mínima), pero no con precipitación. Esto parece indicar que R134 alcanzó mayor engrosamiento

con menos precipitación, mientras que todos los demás clones se relacionaron con la temperatura. Al respecto, algunos autores (Reyes-Moreno et al., 2020) relaciona el proceso de floración con las condiciones medioambientales y prácticas culturales, fundamentado en el aumento de carbohidratos y nitrógeno en la planta (mayoritariamente en hojas) para una mayor producción de flores y frutos.

Cuadro 6. Relación entre engrosamiento del tronco y las variables temperatura y precipitación en árboles de rambután. EELD 2021.

Engrosamiento (mm)/Clon		Temperatura			Precipitación promedio
		Mínima	Media	Máxima	
Jeetle	<i>r</i>	0,63	0,77	0,70	0,10
	<i>p</i>	0,0063	0,0003	0,0019	0,6998
R167	<i>r</i>	0,61	0,70	0,66	0,14
	<i>p</i>	0,0093	0,0019	0,0042	0,5797
R134	<i>r</i>	0,19	0,42	0,38	-0,13
	<i>p</i>	0,4742	0,0950	0,1354	0,6314
R162	<i>r</i>	0,57	0,52	0,49	0,28
	<i>p</i>	0,0161	0,0329	0,0456	0,2711
Rongrien	<i>r</i>	0,34	0,52	0,56	0,12
	<i>p</i>	0,1757	0,0337	0,0632	0,6395

**r*= Coeficiente de correlación de Pearson

***p*=Probabilidad

Es interesante que, a pesar de que no hubo significancia en la correlación entre el engrosamiento efectivo de los cinco materiales y la precipitación, el grosor mostró un serpenteo similar al de la precipitación, sobre todo en algunos períodos

(Figura 10). Además, durante enero del 2019 se presentó el menor valor (promedio mensual) de precipitación de todo el periodo de evaluaciones con 1,95 mm; momento en el cual, todos los materiales muestran una disminución del valor de engrosamiento efectivo, siendo el material R162 el que presentó el menor engrosamiento (3,17mm). Finalmente, en agosto del 2021 se registró el mayor valor de esta variable (12,22 mm) en R134.

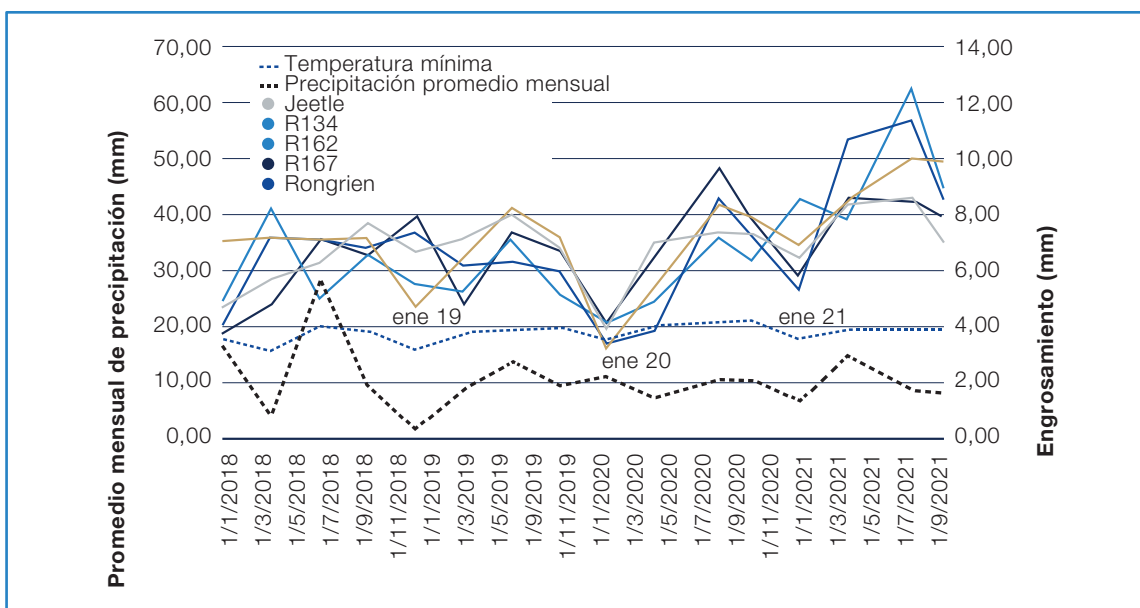


Figura 10. Cronología del engrosamiento del rambután con variables climáticas. EELD 2021.

Durante el periodo 2019 (Figura 11), el primer evento de floración se registró en febrero y 18 días antes se dio la menor temperatura mínima (16,55 °C) junto con un período sin precipitación de 18 días, el de menos precipitación promedio mensual (1,95 mm). Esa relación coincide con lo reportado por Arias y Calvo (2014) para la Región Brunca de Costa Rica, donde consideran necesarios periodos sin disponibilidad de agua en el suelo para inducir la floración de los árboles.

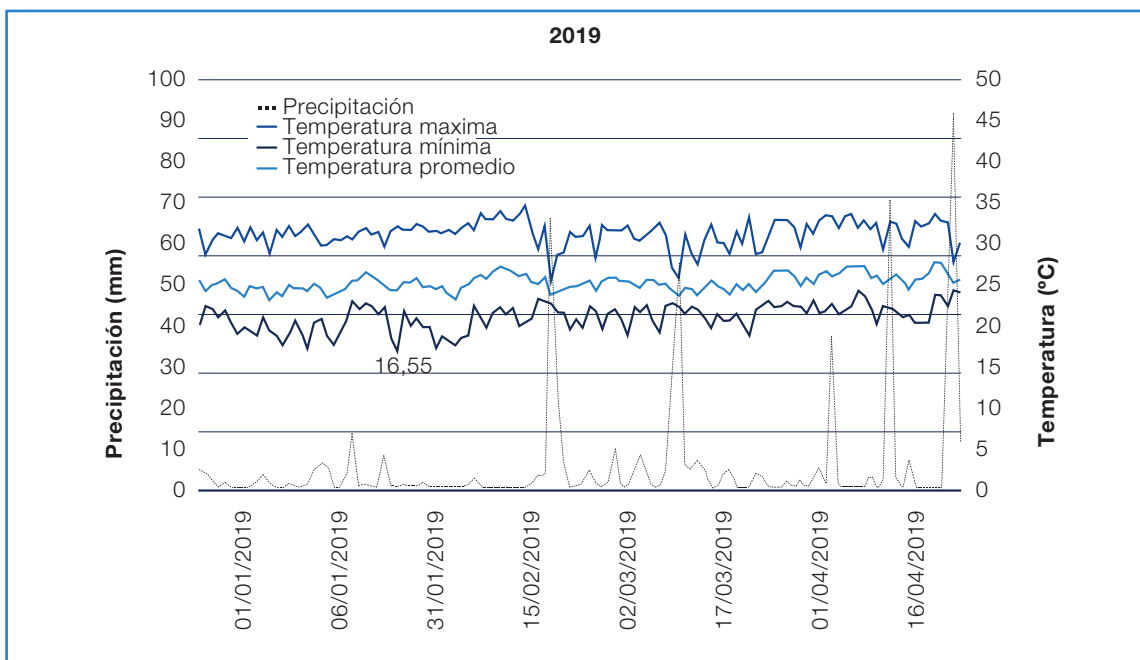


Figura 11. Datos climáticos de enero a marzo año 2019. EELD, 2021.

Para el 2020, las floraciones iniciales se registraron la primera semana de abril, antecedida de dos periodos secos de 6 días en febrero y de 10 días en marzo; así como, una temperatura mínima mensual de 16,56 °C que se dio en los primeros días de febrero (Figura 12). Lo anterior, sugiere una aparente relación entre las temperaturas bajas y periodos secos con la inducción floral. Al respecto, Diczbalis (2002) while

rambutan production ranges from 500 to 1000 tonnes/annum valued at a maximum of \$4.5M. The production of these crops in Australia is still in its infancy with rapid development in industry size, marketing and export opportunities occurring within the last decade. Despite the rapid growth in these industries, there is still little research and documentation on production requirements.

Both industries in association with RIRDC, DPI (Queensland Horticulture Institute, manifiesta que temperaturas altas promueven el crecimiento de flujo vegetativo y que es necesario que este se detenga y se acumulen carbohidratos en las hojas para que se promueva la diferenciación floral y este fenómeno se manifiesta con bajas temperaturas y estrés hídrico.

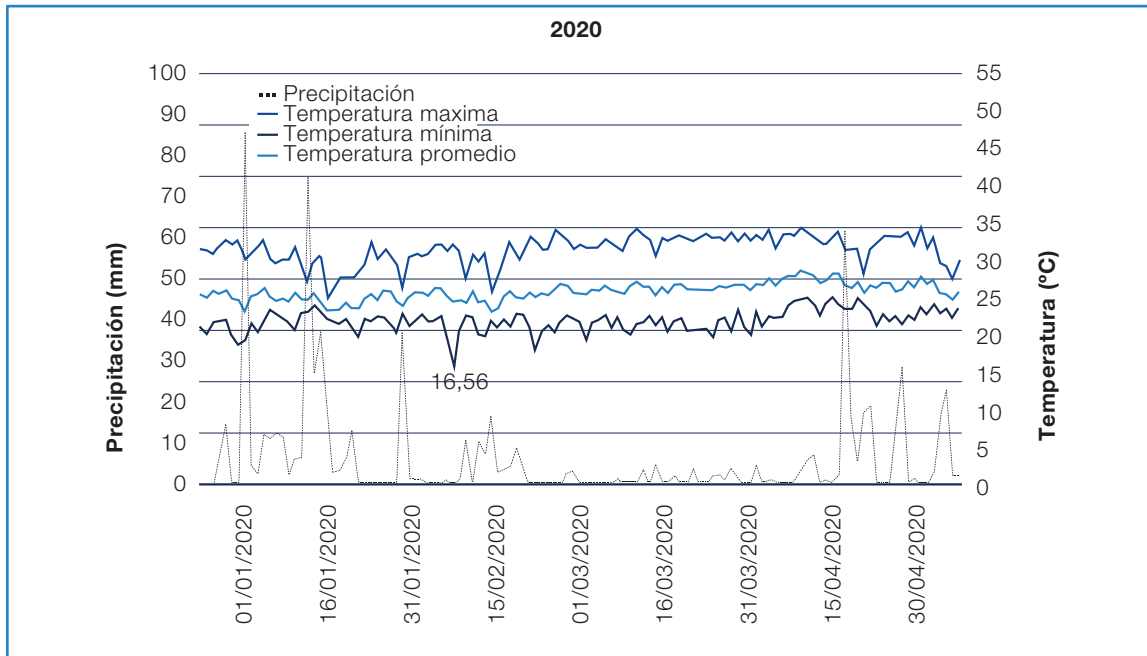


Figura 12. Datos climáticos de enero a marzo del año 2020. EELD, 2021.

En el año 2021 (Figura 13), no se presentó floración, eso coincidió con el aumento de la temperatura mínima (19,01 °C) a finales de enero. A pesar de registrarse cinco días sin precipitaciones en enero y seis días en febrero, ese número de días no fue suficiente para provocar el estrés hídrico necesario para inducir la floración. Además, las temperaturas mínimas registradas en esos periodos fueron 20,73 y 21,08 grados Celsius, respectivamente; mientras que las máximas fueron de 32,0 y 32,65; o sea, dos

grados por encima de las máximas, dos y medio grados más que las mínimas del año anterior; en el cual, sí se presentó floración. Al respecto, (Fischer et al., 2012) indican que la temperatura influye en todos los procesos que fomentan el crecimiento, como la fotosíntesis y el transporte de foto asimilados; siendo la temperatura nocturna la de mayor influencia debido a que, en muchos casos, la mayor parte de los carbohidratos son traslocados durante horas de la noche.

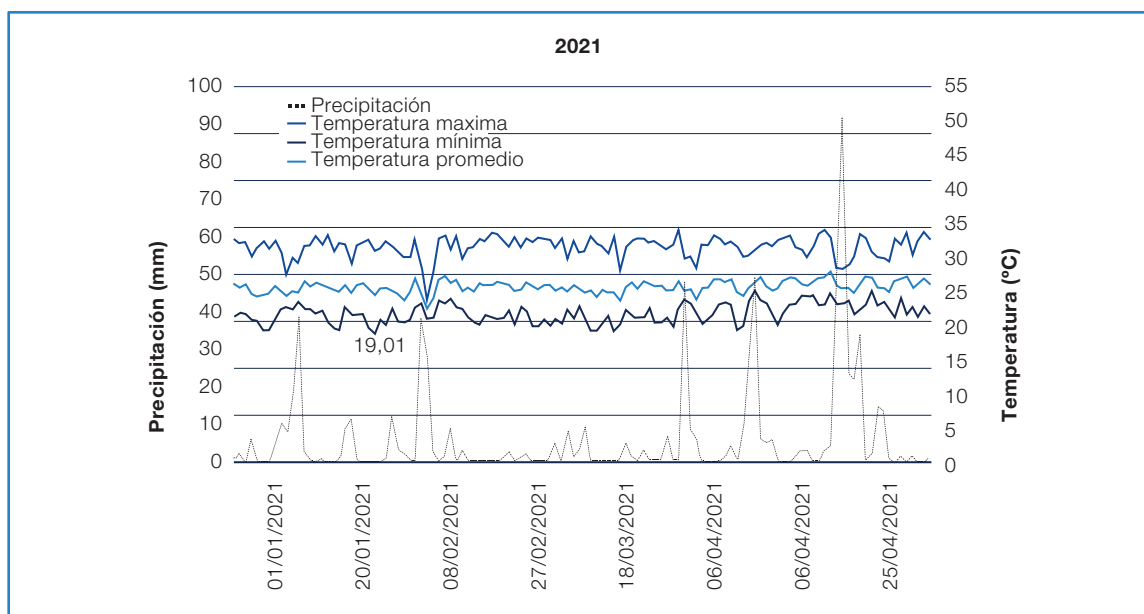


Figura 13. Datos climáticos de enero a marzo del año 2021. EELD, 2021.

CONCLUSIONES

El material Rongrien presentó mayor porcentaje de prendimiento en la injertación.

Rongrien fue diferente en la forma de la hoja (ovoide).

Para los años 2019 y 2020 temperaturas mínimas de entre 16,55 y 16,56 °C, así como entre 10 - 18 días sin precipitación, fueron inductores naturales para promover la diferenciación floral.

El clon con menor número de días a floración fue R134, también, el que mostró una mayor sensibilidad de respuesta a las variables climáticas (temperatura y precipitación) y más árboles en producción.

En las condiciones de este estudio, no hubo una relación proporcional entre el grosor de la base de la copa y la floración.

LITERATURA CITADA

Arias, T. M., & Calvo, V. I. (2014). El cultivo de rambután o mamón chino. San José, Costa Rica: MAG-INTA-FITTACORI.

Arias Cruz, M. E., Velásquez Ramírez, H. A., Mateus Cagua, D., Chaparro Zambrano, H. N., & Orduz Rodríguez, J. O. (2016). Rambután: Un nuevo frutal tropical para Colombia con potencial para el mercado interno y de exportación. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 10(2), 262-272. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5761>

Caballero-Pérez, J. F., Arévalo-Galarza, L., Avendaño-Arrazate, C. H., Cadena-Iñiguez, J., Valdovinos-Ponce, G., & Aguirre-Medina, J. F. (2011). Cambios físicos y bioquímicos durante el desarrollo y senescencia de frutos de rambután (*Nephelium lappaceum* L.). Revista Chapingo. Serie horticultura, 17(1), 31-38. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000100006&lng=es&tlng=es. +](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000100006&lng=es&tlng=es.)

Calvo I., Montero. A., & Arias M. (2009). Evaluación de frutos en árboles sobresalientes de rambután (*Nephelium lappaceum*), identificados en plantaciones propagadas por semilla en la región Brunca. Informe final de investigación. INTA, MAG, FITTACORI.

Castillo-Vera, A., López-Guillén, G., & Sandoval-Esquivel, A. (2017). LA HISTORIA DEL CULTIVO DE RAMBUTAN (*Nephelium lappaceum* L.) EN MEXICO. AGROProductividad, 10(9), 53+. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/191>.

Diczbalis, Y. (2002). Rambutan: Improving Yield and Quality: a Report for the Rural Industries Research and Development Corporation. Rural Industries Research and Development Corporation.

Fischer, G., Almanza-Merchán, P. J., & Ramírez, F. (2012). Relación fuente-vertedero en especies frutales. Una revisión. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 6(2), 238-253. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732012000200011&lng=en&tlng=es.

Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA). (2012). Manual para el cultivo y propagación del rambután en Honduras. FHIA. http://www.fhia.org.hn/html/Programa_de_Diversificacion.html

Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA). (2014). Recomendaciones prácticas para el manejo del rambután durante el periodo de floración y fructificación. Hoja Técnica N°7. FHIA. http://www.fhia.org.hn/html/Programa_de_Diversificacion.html

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2015). VI Censo Nacional Agropecuario: Cultivos Agrícolas, Forestales y Ornamentales.

International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI). (2003). Descriptors for Rambutan (*Nephelium lappaceum*).

Low, K. (2019). Asian Fruits and Berries: Growing Them, Eating Them, Appreciating Their Lore. McFarland.

Muhammed, S., Kurien, S., Iyer, K. S., Remzeena, A., & Thomas, S. (2019). Natural diversity of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) in Kerala, India. Genetic Resources and Crop Evolution, 66(5), 1073-1090. <https://doi.org/10.1007/s10722-019-00771-z>

Reyes-Moreno, M., García-Villanueva, E., Chávez-Franco, S., Muratalla-Luna, A., Reyes-Moreno, J., & Aguilar-Luna, J. M. E. (2020). Fertilización en rambután (*Nephelium lappaceum* L.) para mejorar la calidad de frutos. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 7(1). <https://doi.org/10.19136/era.a7n1.2412>

Saborío D., (2021). Caracterización física/química de cinco clones asiáticos de rambután (*Nephelium lappaceum*), cultivados en el Trópico Húmedo de Costa Rica. Informe final. INTA.

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA). (2019).

Boletín Estadístico Agropecuario N° 29. Serie cronología 2015-2018.

Sacramento, C. K. D., & Andrade, R. A. (2014). Cultivo do rambotã. Revista Brasileira de Fruticultura, 36(1), 79-85. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-448/13>

Tripathi, P. (2021). Tropical Fruits Crops. 14-Rambutan-542-575 pp.

Vargas, A. (2003). Descripción morfológica y nutricional del fruto de rambután (*Nephelium lappaceum*). Agronomía Mesoamericana, 14(2), 201-206. <https://doi.org/10.15517/am.v14i2.11949>

FUNCIONALIDAD AGRO-ECOSISTÉMICA PARA EL MEJORAMIENTO DEL PAISAJE RURAL

CASO: GHANA Y COSTA RICA

Melissa Abarca Ramírez¹, Sergio Abarca Monge², Zhenyu Wang³

RESUMEN

Funcionalidad agro-ecosistémica para el mejoramiento del paisaje rural. Caso Ghana y Costa Rica. Se seleccionaron 16 y 14 sitios con estaciones meteorológicas de Ghana y Costa Rica respectivamente donde la precipitación máxima fuera cercana a los 2000 mm anuales. Se tomaron seis variables: precipitación (P) acumulada en mm/año; humedad relativa (HR) en % y temperatura (T) (°C), biotemperatura (BIOT), evapotranspiración potencial (EVTp) y relación EVTp/P. Se concluyó que los ecosistemas Costa Rica tienden a ser más sensibles a factores biológicos, como el caso de la introducción transfronteriza, involuntaria o no de especies nuevas. Mientras en el caso de Ghana sus ecosistemas tienden a ser sensibles en los factores abióticos como la reducción de agua en el suelo y el incremento de temperatura, con menos posibilidad de establecimiento de una gran cantidad de especies introducidas.

Palabras clave: Ghana, Costa Rica, agroecosistemas, zonas de vida, nativizadas.

ABSTRACT

Agro-ecosystem functionality for the improvement of rural landscapes. Case of Ghana and Costa Rica. Sixteen and fourteen sites were selected with meteorological stations in Ghana and Costa Rica, respectively, where the maximum annual precipitation was close to 2000 mm. Six variables were measured: annual accumulated precipitation (P) in mm/year; relative humidity (RH) in %; temperature (T) (°C); biotemperature (BIOT); potential evapotranspiration (ETP); and the ETP/P ratio. It was concluded that Costa Rican ecosystems tend to be more sensitive to biological factors, such as the cross-border introduction, whether intentional or not, of new species. In the case of Ghana, its ecosystems tend to be more sensitive to abiotic factors, such as soil water reduction and temperature increase, with less likelihood of establishment for a large number of introduced species.

Keywords: Ghana, Costa Rica, agro-ecosystems, life zones, naturalized species.

¹ Universidad de Costa Rica, UCR. ORCID: 0000-0002-6088-6371. Correo melissa.abarcaramirez@ucr.ac.cr

² Instituto Nacional de Transferencia en Tecnología Agropecuaria. INTA. ORCID: 0000-0001-8953-1243. Correo sabarcam@inta.go.cr

³ Georgetown Preparatory S. ORCID: 0009-0007-8172-5861. Correo zhawang@gprep.org

INTRODUCCIÓN

En la restauración de paisajes debe tomarse en cuenta el acervo de recursos existentes de cada región y el conocimiento local de sus pobladores como base para proponer cambios en función de la ciencia y la técnica. Los análisis geo-prospectivos que toman en cuenta lo anterior son un buen insumo en el diseño de proyectos de restauración de paisajes. Los elementos a restaurar deberán ser desarrollados y validados *in situ* junto con los productores agropecuarios. En este contexto se hace una comparación de elementos ecológicos comunes entre Ghana y Costa Rica, pero con dinámicas socioeconómicas contrastantes. De acuerdo con la definición teórica amplia, Newton y Tejedor (2011) la restauración de paisajes es el proceso por el cual un paisaje dañado o

degradado es restaurado a un estado en el que pueda cumplir con una variedad de funciones ecológicas, sociales y económicas.

Desde una perspectiva ecológica, de acuerdo con el esquema de zonas de vida de Holdridge (1978) Costa Rica presenta una mayor cantidad de zonas, en especial en ecosistemas con mayor humedad que Ghana. Sin embargo, la costa pacífica norte de Costa Rica aproximadamente 25 % de su territorio, mantiene una estacionalidad climática con un periodo de mínima precipitación definido; al que se denomina como época seca, con la misma tendencia anual que en Ghana, en ambos casos con precipitaciones acumuladas anuales cercanas a los 2000 mm anuales.

Cuadro 1. Indicadores socioeconómicos del Banco Mundial (2024) Ghana y Costa Rica.

Indicador	Ghana	Costa Rica
Área total (Km²)	238.533	51.100
PIB (\$/per capita)	2.238	16.595
Densidad de población (hab/Km²)	134	102
Área Forestal (% del país)	35	59
Emisiones de GEI (CO ₂ ton/per capita)	0.6	1.4
Esperanza de vida (años)	64	77

En Costa Rica la restauración de paisajes ha generado propuestas que van desde la reforestación con plantaciones en bloques de una sola especie exótica introducida, con poco o ningún rol ecosistémico (de Camino y Budowski 1995) hasta nuevos agro-ecosistemas con roles ecosistémicos y socioeconómico adecuados, como es la combinación de árboles nativos con especies de pastos nativizados tipo C4 procedentes de África (Morantes y Renjifo 2018). Mientras en Ghana un árbol americano como el cacao se puede visualizar como nativizado, siendo una arbustiva C3 dentro de un ecosistema de bosque seco (Barvo et al 2011; Jagoret et al 2020). Por otra, parte según Crutzen (2002) en el Antropoceno la actividad humana ha llegado a ser la fuerza dominante que impulsa los cambios en la Tierra, alterando la mayoría de los hábitats, mediante la contaminación y el cambio climático entre otros aspectos, siendo la causa principal de la

extinción de especies y el rompiendo del ciclo natural de nutrientes. No obstante, estos ecosistemas de paisajes de árboles con pasturas en la región más tropical de América se deben planificar técnicamente ya que no son del todo autóctonos. Por ejemplo en el Caribe de Costa Rica Velkamp (1994) encontró una baja productividad de las pasturas mal manejadas de especies consideradas nativizadas con pérdidas significativas de carbono del suelo posterior a la deforestación. Dentro de este contexto, para llevar a cabo procesos de restauración en una región, el primer paso es salvaguardar los ecosistemas naturales como bancos de biodiversidad (Allan et al 2022). En segundo lugar, diseñar sistemas de producción agropecuaria donde las especies introducidas se acoplen al conjunto de especies naturales de una zona de vida y generen roles ecosistémicos, que permiten mejorar la resiliencia del conjunto de especies que conforman el agro-ecosistema

ante los efectos detrimentales del antropoceno. Esto permitiría que las personas continúen con sus medios de producción de tal forma que les provean una vida digna de desde el punto de vista socioeconómico (Abarca-Monge 2016). En este sentido los sistemas agroforestales como mezclas de especies nativizadas y originarias en diferentes arreglos temporal y espacial han sido una solución adecuada, generando servicios ecosistémicos y manteniendo los medios de vida de las personas en el medio rural tropical (Montagnini *et al* 2015).

En la era del Antropoceno donde se está dando un aumento de CO₂, es de esperar cambios en las características de la vegetación y que algunas plantas aumenten en forma diferenciada su productividad impulsando su competitividad en los hábitats, con consecuencias para la estructura de la comunidad vegetal (paisajes) y la diversidad donde crecen (ecosistemas) Bellard *et al* 2012. Los rasgos que se mejoran con niveles elevados de CO₂ también confieren una mayor competencia a las especies invasoras (Terrer *et al* 2021), se espera que las plantas C3 mejoren su productividad en la medida que aumente la concentración atmosférica de CO₂ y los pastos con metabolismo fotosintético tipo C4 con adecuados niveles de nitrógeno serían capaces de incrementar fuertemente su producción de biomasa (Hager *et al* 2016). Sin embargo el incremento de la temperatura ambiente puede cambiar la respuesta estomática al incremento de la concentración atmosférica de CO₂ al disminuir el periodo de apertura en un amplio grupo de especies bajo numerosas condiciones, y aunque aún no es concluyente, se considera que podría influir negativamente en la evapotranspiración (ET) del ecosistema especialmente en

plantas tipo C3 (Bernacchi *et al* 2012), por lo que los árboles del trópico podrían crecer más lentamente. Otros elementos a considerar en el diseño y arquitectura de los agro-ecosistemas tropicales, además de los fisiológicos, son los concernientes a mantener la salud del suelo. Considerando que las áreas en monocultivo en ambientes cercanos al paralelo ecuatorial tienden a mantener bajos niveles de carbono Guo y Gifford (2002), y que una alta proporción de las especies arbóreas de los bosques tropicales de América Central están compuestos por leguminosas (Gei *et al* 2018) donde se han asociado precipitaciones bajas (<1000 mm) y muy altas (>3000 mm) como la principal variable de pérdidas de carbono orgánico en suelo en usos agropecuario después de la deforestación, mientras que lluvias entre 2000 a 3000 mm se vinculan a fuertes incrementos (FAO, 2019). Los agroecosistemas de estas regiones tropicales necesitan altas tasas de reposición de carbono y nitrógeno en el agro-ecosistema (Malhi *et al* 1999; Weintraub *et al* 2016), que se pueden obtener con combinaciones de plantas de diversas procedencias.

El objetivo de este estudio fue realizar un ejercicio de diferencias y semejanzas de rasgos ecológicos a considerar en el diseño de agroecosistemas en países de la faja más tropical en diferentes continentes a los que cruzan el paralelo 10 latitud norte, con el fin de observar elementos a considerar en la restauración antropogénica y efectiva del paisaje en pequeña escala en la región seca de Costa Rica; para apoyar en una forma holística la gestión integrada de los recursos naturales, los medios de vida y costumbres de las comunidades de zonas de vida, y reducir la tendencia del bosque seco de Costa Rica a la aridez.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron 16 sitios con estaciones meteorológicas de Ghana donde la precipitación máxima fuera cercana a los 2000 mm anuales, siendo que quedaron distribuidas en prácticamente todo el territorio. En Costa Rica, se localizaron 14 estaciones meteorológicas en el Pacífico Seco y otras zonas con un promedio de lluvia acumulada con un límite semejante. Para este

estudio se definieron tres variables meteorológicas: precipitación (**P**) acumulada en mm/año; humedad relativa (**HR**) en % y temperatura (**T**) promedio, diaria por año en °C y otras tres variables eco-climáticas, de acuerdo con el esquema de zonas de vida de Holdridge (1978) (Jiménez 1982; Jiménez 2017). El cálculo de estas últimas se detalla a continuación:

Biotemperatura (BIOT)

La biotemperatura se utilizó para describir la temperatura media anual de crecimiento de los ecosistemas, teniendo en cuenta solo aquellos periodos en los que la temperatura fue favorable para el crecimiento biológico; en este caso se utilizó la formula (f1) para excluir las temperaturas extremadamente altas y vincularlas con la latitud.

f1

BIOT= t-(3*grados de latitud)*(t-24)2
100

Donde: = temperatura diaria promedio anual
Evapotranspiración potencial (EVTp)

En segundo término la evapotranspiración potencial (EVTp) que se definió como la máxima cantidad de agua que podría ser evaporada y transpirada por la vegetación bajo condiciones climáticas ideales, en cada sitio de estudio, formula (f2). Se considera que la fórmula empleada es de carácter lineal, por lo tanto la constante se dividió en 12 tractos para obtener un valor mensual (4.91) cuando fue necesario.

f2

EVTp=BIOT*58,93
Relación EVTp/P

Como tercera variable importante se seleccionó en forma anual la relación EVTp/P como corrector de la EVTp e indicador de aridez y del estado natural del balance hídrico del ecosistema.

Donde:

- Clima Húmedo: ETP/P < 0.75
- Clima Subhúmedo: 0.75 < ETP/P < 1.0
- Clima Semiárido: 1.0 < ETP/P < 2.0
- Clima Árido: ETP/P > 2.0

Se realizaron diferentes pruebas estadísticas de correlación y multivariable. Se utilizó el método Manhattan o distancia euclídea (Di Rierzo et al 2008) para la formación de grupos de sitios en la clasificación de aridez.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las variables anualizadas por país se desprende en forma general que las zonas estudiadas de Costa Rica fueron menos secas porque presentan una mayor precipitación acumulada y una temperatura media menor que las de Ghana (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación entre Costa Rica y Ghana de seis variables climáticas anuales Banco Mundial. (2024).

Country		Costa Rica		Ghana	
		Moda	Promedio	Moda	Promedio
Precipitation	mm	1040.0	1700.4 (266) **	534.0	917.4 (338.2) **
R. Humidity	%	60.2	76.0 (8.1)	41.8	66.7 (13.6)
Temperature	°C	16.6	25.0 (3.6) **	27.6	29.1 (1.7) **
EVTp	mm	997.0	1336.8 (139.7)	372.8	1205.5 (337)
BIOT	°C	16.6	22.7(2.4)	6.3	20.5(5.7)
EVTp/P		0.56	1.5 (2.6)	0.59	1.4(0.4)

** en la misma fila difieren significativamente (P>0.001)

() Desviación típica

La figura 1 muestra la variación anual para las variables eco-climáticas, en el caso de la BIOT y la EVTp, se observa que la mayoría de la variación de los sitios secos de Costa Rica estaba contenida en Ghana, mientras que para la relación EVtp/P Ghana presentó muy poca variación y dentro del rango de variación amplio de Costa Rica. Por lo tanto, para el crecimiento de la vegetación, Costa Rica mantiene una mayor Biot y EVT en los sitios estudiados denominados secos, que podría indicar que es adecuada aún para el crecimiento

de árboles, pero con una tendencia de crecimiento estacional después de una relación EVTp/P mayor a 1.0, indicando posibles tasas de crecimiento más lentas para este tipo de vegetación en estos entornos ecológicos, propiciando las condiciones para una mayor presencia de plantas herbáceas con tolerancia a altas temperaturas y menores requerimientos de humedad. Mientras en Ghana la tendencia es a un paisaje con mayor presencia de plantas herbáceas con muy pocos de árboles.

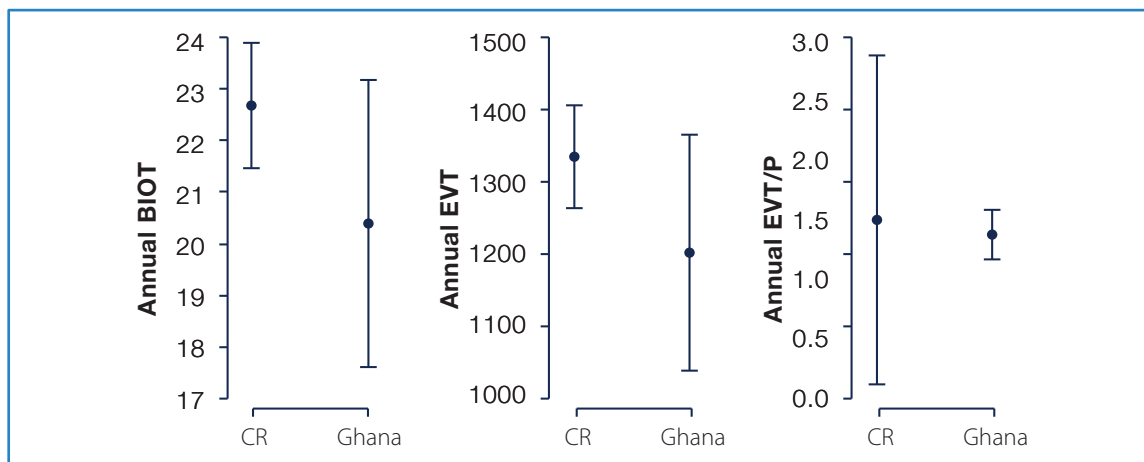


Figura 1. Variación anual de la BIOT, EVTp y relación EVTp/P, en Costa Rica y Ghana, 2024.

En concordancia con el esquema de zonas de vida de Holdridge (1966), se observó una reducción importante de la temperatura ($P < 0,001$) de $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 metros de incremento en altitud, y una tendencia ($P < 0,027$) incremental de $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada grado de la latitud. En ambos casos con una magnitud diferente entre Ghana y Costa Rica. Por lo que se considera que la corrección por altitud y latitud fue importante para estimar la BIOT.

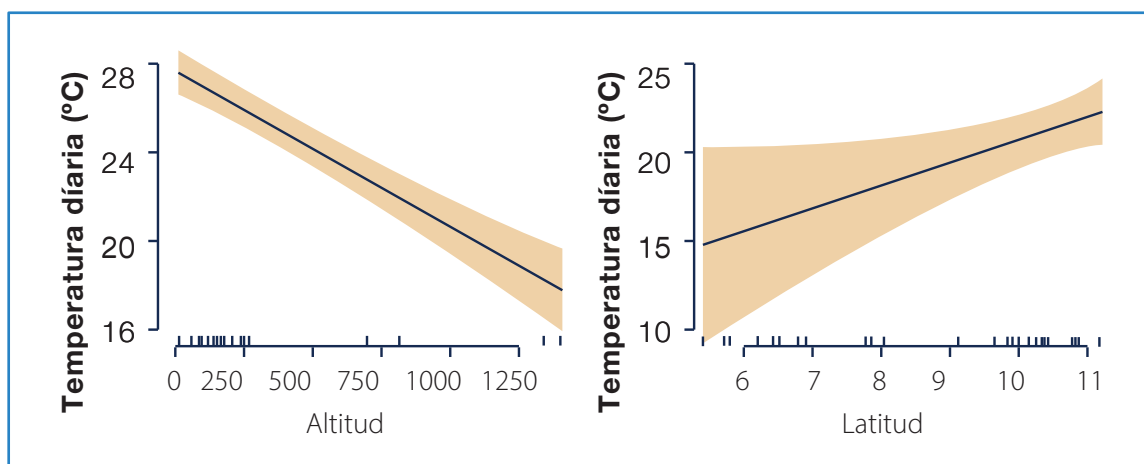


Figura 2. Variación de la temperatura diaria anual con respecto a la altitud y latitud, 2024.

De acuerdo con la figura 3, Ghana presentó solamente dos grados de aridez; con siete sitios semiáridos y nueve áridos, con valores promedio de 1.4 y 2.6 EVTp/P respectivamente. Los datos de los sitios seleccionados como secos en el caso de Costa Rica se agruparon en tres grados de aridez: semiárido cuatro lugares (1.2 EVTp/P), subhúmedo y húmedo cinco sitios por cada nivel (0.88 y 0.68 EVTp/P respectivamente). En el caso de Ghana los conglomerados tendieron a ser más secos y parecerse más entre ellos, mientras en el caso de Costa Rica la tendencia es a una mayor humedad y diferencia entre grupos. Este hecho es importante desde el punto de vista ecológico, pues

los ecosistemas de los países no son homólogos a pesar de ubicarse en el mismo paralelo y con precipitaciones anuales semejantes. Por lo tanto la restauración debe hacerse considerando los elementos ecológicos de cada sitio y con función antropogénica (demografía, cultura, costumbres, economía) con la finalidad de mejorar los medios de vida de los pobladores de esos sitios. La información obtenida indica que los elementos restauradores deben diferenciarse de acuerdo a cada nivel de aridez en cada país, como tipo de especie vegetales a fomentar, el uso y función agro-eco-sistémica en el agroecosistema.

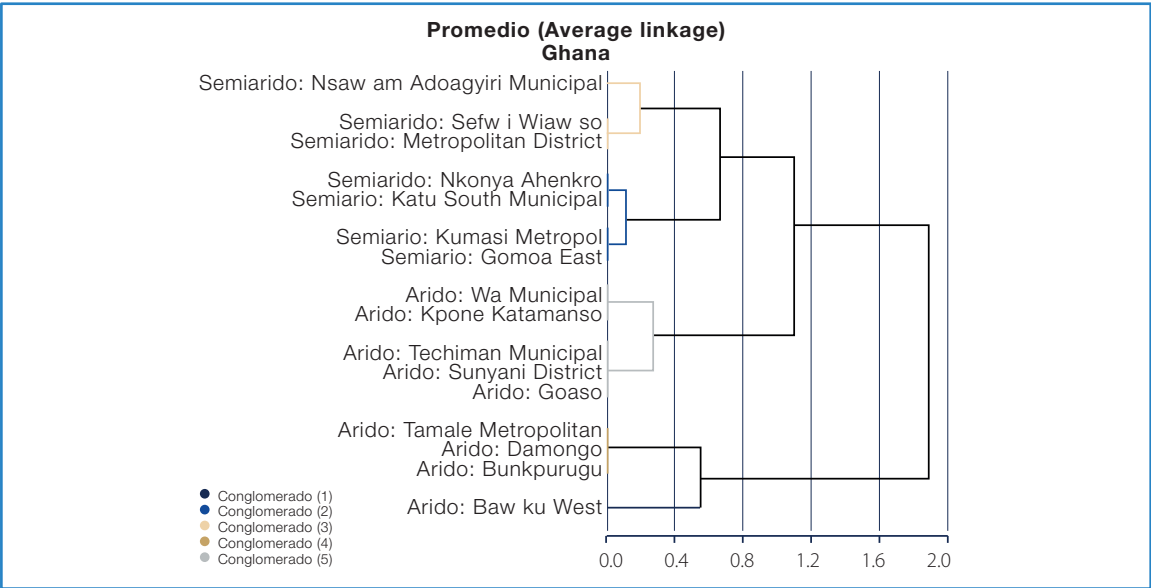


Figura 3. Separación por conglomerados de los sitios en estudio, utilizando las variables: relación humedad, altitud y ETVp/P por país e indicador de aridez, 2024.

El cuadro 3 muestra los resultados del análisis multivariado de cuatro variables consideradas para la definición de cada época del año. Se observa que las épocas seca y lluviosa son diferentes entre países reforzando lo indicado anteriormente que los climas no son homólogos.

Cuadro 3. Época de baja y alta precipitación, análisis multivariable comparativo.

País		Periodo		T	HR		P	BIOT	
		Meses	°C		%	mm		°C eq	*
Costa Rica	Lluvioso	8-9	24.7		82.4	207.4		22.9	a
	Seco	3-4	25.5		66.4	20.1		22.5	b
Ghana	Lluvioso	8-6	27.8		80.0	124.2		23.2	c
	Seco	4-6	30.9		49.3	22.6		17.2	d

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Por lo tanto, desde un punto de vista ecológico, las diferencias en el periodo seco podrían ser de importancia en el tipo de vegetación predominante. Donde la BIOT y HR, para el caso de Ghana indicaron que el crecimiento vegetativo tiende a muy bajo durante varios meses al año. En la figura 4 se observa en forma mensual para todos los sitios estudiados la relación altamente significativa ($p < 0,0001$) temperatura: biotemperatura, con un intercepto matemático de las curvas de ambos países en 26.5°C lo que se puede interpretar como el punto de mayor crecimiento vegetal en condiciones adecuadas de humedad del suelo. La BIOT en Costa Rica fue más favorable para el crecimiento continuo de la vegetación durante

todo el año. Lo anterior es de suma importancia en temas de restauración del paisaje con participación y producción antropogénica. En el caso de Costa Rica es posible que sus ecosistemas tiendan a ser más sensibles a factores biológicos (MINAE 2012), como el caso de la introducción transfronteriza, involuntaria o no de nuevas especies, desde arvenses altamente invasivas hasta plantas de cultivo en las que se inviertan recursos de todo tipo para su establecimiento. Mientras en el caso de Ghana sus ecosistemas tienden a ser sensibles en los factores abióticos como la reducción de agua en el suelo y el incremento de temperatura, con menos posibilidad de establecimiento de una gran cantidad de especies introducidas.

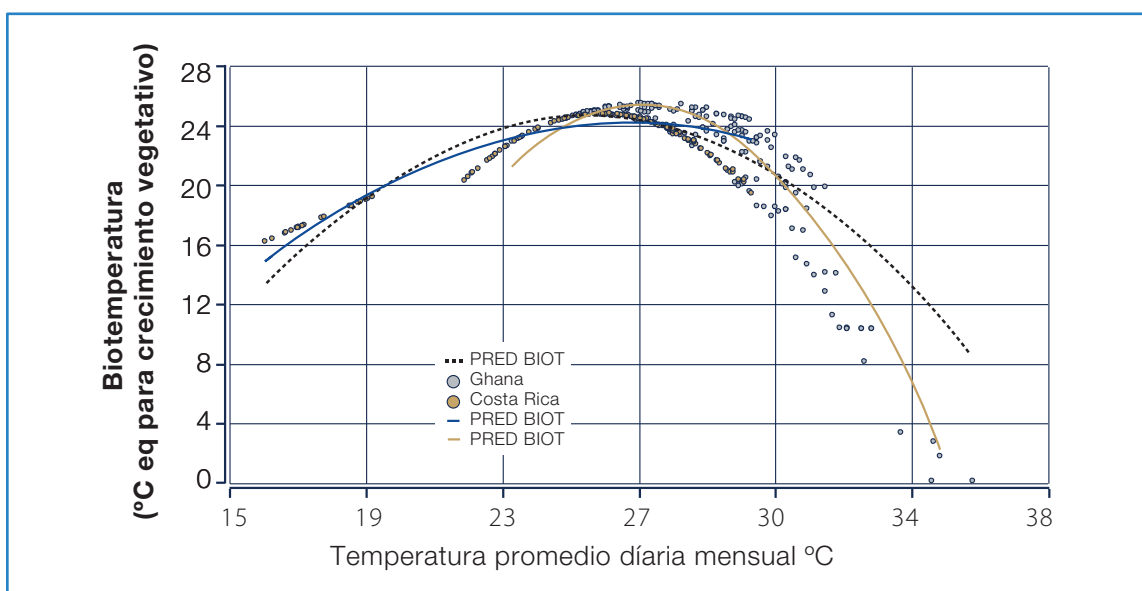


Figura 4. Relación Temperatura: Biotemperatura, por mes por sitio de estudio, 2024.

En conclusión, la restauración antropogénica asistida debe atender a las necesidades ecológicas y de las personas que tienen sus medios de vida en las zonas a restaurar y debe ser cuidadosamente diseñada. En el contexto actual de cambio climático la inmediatez por proceso de secuestro de carbono a través de la introducción de especies introducidas en plantaciones forestales en monocultivo no es la mejor solución, ni ecológica

ni socioeconómica. Se plantea como una solución sustentable la construcción de paisajes de agro-ecosistema biodiversos, que además de cumplir con roles ecosistémicos concretos múltiples y simultáneos, reducirían la pobreza y migración de las personas de las zonas intervenidas por proyectos de restauración de paisajes, generando bienestar y progreso, en un entorno agroecológico más sostenible.

LITERATURA CITADA

- Abarca-Monge, S. (2016). La visión costarricense de cómo la agricultura enfrenta al cambio climático. *Revista Ambientico*, 258, 50. <https://www.una.ac.cr/revistaambientico/la-vision-costarricense-de-como-la-agricultura-enfrenta-al-cambio-climatico>
- Allan, J. R., Possingham, H. P., Atkinson, S. C., Waldron, A., Di Marco, M., Butchart, S. H. M., Adams, V. M., Kissling, W. D., Worsdell, T., Sandbrook, C., Gibbon, G., Kumar, K., Mehta, P., Maron, M., Williams, B. A., Jones, K. R., Wintle, B. A., Reside, A. E., & Watson, J. E. M. (2022). The minimum land area requiring conservation attention to safeguard biodiversity. *Science*, 376(6597), 1094–1101. <https://doi.org/10.1126/science.abl9127>
- Banco Mundial. (2024). Data. <https://data.world-bank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>
- Bravo, M. C., Somarriba, E., & Arteaga, G. (2011). Factores que afectan la abundancia de insectos polinizadores del cacao en sistemas agroforestales. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 119-131. <https://doi.org/ISSN-e 2256-2273, ISSN 0120-0135>
- Bellard et al (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. [PDF] Impacts of climate change on the future of biodiversity. | Semantic Scholar
- Bernacchi, C. J., Kimball, B. A., Quarles, D. R., Long, S. P., & Ort, D. R. (2007). Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO₂] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. *Plant Physiology*, 143(1), 134-144. <https://academic.oup.com/plphys/article/143/1/134/6106572>
- Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. *Nature*, 415(6867), 23. DOI: 10.1038/415023^a
- Geology of Mankind | SpringerLink
- de Camino R y G. Budowski. 1995. Impactos ambientales de las plantaciones forestales. *Revista Forestal Centroamericana* 101. Turrialba. (mimeogr).
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2008). InfoStat, versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. FAO. content (fao.org)
- Guo, L.B.; Gifford, R.M. 2002. Soil Carbon Stocks and Land Use Change: a Meta Analysis. *Global Change Biology* 8:345-360. *Global Change Biology | Environmental Change Journal | Wiley Online Library*
- Hager, H. A., Ryan, G. D., Kovacs, H. M., & et al. (2016). Effects of elevated CO₂ on photosynthetic traits of native and invasive C3 and C4 grasses. *BMC Ecology*, 16(28). <https://doi.org/10.1186/s12898-016-0082-z>
- Holdridge L. 1978. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216p.
- Jiménez S. H. (1982). Anatomía del sistema de clasificación de Holdridge. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 29p. (mimeogr). Recuperado de Anatomia_del_sistema_de_clasificacion_Holdridge.pdf (catie.ac.cr)
- Jiménez S. H. (2017). Dr. Leslie R. Holdridge: La capacidad de crear a partir de lo cotidiano. *Revista Ambientico*. 263:7 Recuperado de Dr. Leslie R. Holdridge: la capacidad de crear a partir de lo cotidiano – Revista Ambientico (una.ac.cr)
- Jagoret, P., Saj, S., & Carimentrand, A. (2020). Cacaocultura agroforestal en África: el arte de combinar producción sostenible y servicios ecológicos. *Perspective*, 54, 1-4. <https://doi.org/10.19182/perspective/31918>
- López, R. H., Espejel, G. V., & Moreno-Casasola, P. (2014). Zacate alemán (*Echinochloa pyramidalis*): planta invasora de humedales costeros del sureste mexicano. *Investigación Ambiental, Ciencia y Política Pública*. (PDF) Zacate alemán (*Echinochloa pyramidalis*): planta invasora de humedales costeros del sureste mexicano (researchgate.net)
- Gei, M., Rozendaal, D.M.A., Poorter, L. et al. (2018) Legume abundance along successional and rainfall gradients in Neotropical forests. *Nat Ecol Evol* 2, 1104–1111. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0559-6>

Malhi, Y., Baldocchi, D., Jarvis, P. (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22:715–740. pce453 (berkeley.edu)

Morantes-Toloza, J., & Renjifo, L. M. (2018). Cercas vivas en sistemas de producción tropicales: una revisión mundial de los usos y percepciones. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 739-753. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33405>

MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía) (2021). Proyecciones de cambio climático regionalizadas para Costa Rica: (escenarios RC0050-2.6 y RCP-8.5). Instituto Meteorológico Nacional. *ProyeccionesEscenariosClimaticos.indd* (imn.ac.cr)

Montagnini, F.; Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., Eibl, B. (2015). Sistemas agroforestales: Funciones productivas y ambientales. CIPAV/CATIE (CATIE 402) 454 p. *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (catie.ac.cr)

Newton, A. C., & Tejedor, N. (2011). Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal. Estudios de caso en las zonas secas de América Latina. Gland, Suiza: UICN. 409p. untitled (iucn.org)

Terrer, C., Phillips, R.P., Hungate, B.A. et al. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂. *Nature* 591, 599–603 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8>

Veldkamp, E. (1994). Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. In *Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropic of Costa Rica* (Ph. D Thesis). Wageningen University. p. 117. *VeldkampSSSAJ1994.pdf*

Weintraub, S., Cole, R., Schmitt, C., & All, J. (2016). Climatic controls on the isotopic composition and availability of soil nitrogen across mountainous tropical forests. *Ecosphere*, 7(8), 1-13. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1412>

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y ABSORCIÓN DE NUTRIENTES EN EL CULTIVO DE CHILE DULCE

Roberto Ramírez Matarrita¹, Kevin Carrillo Montoya², Alejandro Ureña Sánchez³, Valerie Salazar Castillo⁴

RESUMEN

Análisis del crecimiento vegetal y absorción de nutrientes en el cultivo de chile dulce. Se analizó el crecimiento y se determinaron las curvas de absorción de nutrientes en plantas de chile dulce del híbrido Polaris, desarrolladas en dos casas de mallas, en Cañas, Guanacaste, Costa Rica, durante el periodo comprendido de junio a octubre del 2021. En cada muestreo se tomó una sub muestra de 2 plantas por cada módulo, iniciando al momento del trasplante y continuando posteriormente cada 15 días, para determinar el peso seco y el contenido de N, P, K, Ca, Mg y S, en cada sección de la planta y total, con el fin de calcular la extracción de los nutrientes con una densidad de siembra de 20 833 plantas.ha⁻¹ y un rendimiento de 1,49 kg.planta⁻¹ de fruta comercial obtenida en la prueba. El híbrido de chile dulce requirió un total de 2767 GDTA (grados días de temperatura acumulada) para completar el ciclo de evaluación, presentándose la mayor cantidad de biomasa seca al final del ciclo del cultivo con un peso de 153 g.planta⁻¹, siendo las hojas el órgano que acumuló un mayor peso seco en las primeras etapas (0 - 632 GDTA), representando un 50 % del crecimiento de la planta, mientras que las flores y frutos obtuvieron mayor proporción de biomasa seca durante las etapas de reproducción y cosecha. La máxima acumulación de nutrientes ocurrió entre los 2275 y 2767 GDTA; con un orden de extracción para K>N>Ca>S>Mg y P de 140, 90, 34, 18, 12 y 8 kg.ha⁻¹, respectivamente. Los nutrimentos N, K, Ca, Mg y S se acumularon en mayor cantidad en las hojas y tallo, mientras que, el P en los frutos. En el pico de cosecha, los frutos extrajeron en mayor proporción N, P, K y S, mientras que las hojas mayoritariamente Ca y Mg.

Palabras clave: Curva de absorción, casa de malla, rendimiento, agro climatología, fenología.

Keywords: Absorption curve, mesh house, yield, agroclimatology, phenology.

-
- 1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Costa Rica. rramirez@inta.go.cr
 - 2 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Costa Rica. kcarrillo@inta.go.cr
 - 3 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Costa Rica. aurenas@inta.go.cr
 - 4 Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Costa Rica. vsalazarc@mag.go.cr

INTRODUCCIÓN

El chile dulce es una de las hortalizas más apetecidas y normalmente cultivada por pequeños agricultores (SEPSA 2016). Con el uso de las tecnologías que promueve el INTA, se han generado iniciativas de proyectos promueven aumentar la seguridad alimentaria de las comunidades y fortalecen las economías rurales en la provincia de Guanacaste. Contar con recomendaciones técnicas para la gestión de la nutrición bajo las condiciones de esta zona, contribuye a la sostenibilidad de los sistemas productivos actuales mediante un ahorro de insumos fertilizantes y la reducción del impacto ambiental.

La nutrición en el cultivo de chile dulce es uno de los rubros más importantes entre los costos de producción y representa hasta más de un 10 % del total dependiendo del sistema productivo (Camacho 2017). A parte de influir en la rentabilidad, tiene un efecto directo sobre el desarrollo y productividad de la plantación, debido a que la cantidad de nutrientes que absorbe la planta en relación a su consumo de agua está determinada por las necesidades del cultivo que pueden variar

de un sitio a otro; en este sentido, un desequilibrio en la aplicación de los nutrientes, puede originar desbalances, que inducen no solamente en pérdidas económicas, sino también en daños ambientales.

Segura y Contreras (2015) indican que por medio de los estudios de absorción de nutrientes se pueden relacionar los máximos requerimientos con etapas claves del cultivo, como la floración, fructificación, así como las etapas de menor consumo, lo que genera una planificación más eficiente de la nutrición. En la actualidad se carece de estudios que indiquen los niveles adecuados de elementos según etapas fenológicas para el cultivo de chile dulce bajo las condiciones agroclimáticas de las comunidades que se encuentren dentro de la zona de vida del bosque tropical seco. El objetivo de este trabajo fue generar curvas de crecimiento y absorción de nutrientes en el cultivo chile dulce tipo “Bell” como insumo para afinar las recomendaciones de nutrición que se practican en las comunidades que cultivan esta hortaliza en la provincia de Guanacaste.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se desarrolló en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (E00411952 y N00258587), ubicada en la provincia de Guanacaste, cantón de Cañas, distrito de San Miguel, durante el periodo de junio a octubre de 2021. El sitio se encuentra a 10 m s. n. m. dentro de la zona de vida bosque húmedo premontano según la clasificación de Holdridge (Bolaños et al. 2005).

Condiciones de suelo del sitio

Para realizar la caracterización del medio donde se desarrolló la prueba, se realizó un análisis físico-químico de suelos a partir de una muestra compuesta de 0-20 cm de profundidad; estas características se resumen en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Características químicas del suelo del sitio experimental, Cañas, 2021.

Solución extractora Olsen Modificado		Cmol(+)/L				mg/L					MOS (%)
	pH	K	Ca	Mg	Acidez	P	Fe	Cu	Zn	Mn	
Niveles críticos	5,6	0,2	4	1	0,5	10	10	2	2	5	3
CHILE DULCE	6,6	1,53	15,9	5,3	0,3	50	9	5	2	7	4

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas del INTA. 2021.

Cuadro 2. Características físicas del suelo del sitio experimental, Cañas, 2021.

% Fracción			Clase textural	Densidad aparente	Retención de humedad (atmósferas)		Agua útil
Arena	Arcilla	Limo			0.33	15	
34.1	33.9	32.0	Franco Arcilloso	1.07	15 %	11 %	4 %

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas del INTA. 2021.

Material experimental

Se utilizó el híbrido Polaris, el cual es una planta tolerante al virus del mosaico severo de la papa (PVY), vigorosa, de altura media y con producción de fruta uniforme. La fruta se destaca por poseer una maduración a amarillo, de buen sabor, con un mesocarpio espeso y crujiente.

Desarrollo experimental y manejo agronómico

Los almácigos se elaboraron en un invernadero tipo capilla en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez, en el mes de abril del 2021, utilizando bandejas de polietileno con sustrato inerte (peat moss), aplicándose el riego diariamente por la capilaridad del sustrato y realizándose la nutrición dos veces por semana, utilizando 3 g/l del fertilizante soluble 12-20-30 + Mg. Se utilizaron dos módulos (casas malla) con dimensiones de 7 m de ancho por 14 m de largo y 5 m de altura. Las plantas se protegieron de la intensidad de la lluvia por medio de túneles de 2,3 m de altura por 1 m de ancho, provisto de una cobertura plástica transparente. Se utilizó una malla de sombreo (Sarán) móvil, con 50 % de transmisión de luz para proteger al cultivo de la alta radiación de la época, principalmente en las horas de mayor intensidad según registros de investigaciones anteriores

(10 a.m. a 2 p.m.). En el interior de cada módulo se adecuaron 6 hileras de 0,6 m de ancho por 0,3 m de altura, donde se trasplantaron 180 plántulas en el mes de mayo a una distancia entre centros de hileras de 1,2 m y de 0,4 m de una planta a otra, lo que significó una densidad de siembra de 20 833 plantas. ha⁻¹.

El riego y la fertilización se realizó mediante un sistema presurizado, por medio de un sistema de inyección hidráulico con una proporción de ingreso de 4 % sobre el caudal, impulsado por una moto bomba de 1 Hp, reponiéndose una lámina diaria de 2 mm que es la evapotranspiración de referencia (ET_o) para la época del año en que se desarrolló la investigación. Se utilizaron cintas de goteo con una descarga de 2,1 l/h y una separación entre emisores de goteo de 0,20 m. En los primeros 15 días después del trasplante se utilizó un coeficiente de cultivo (kc) de 0,50, posteriormente hasta el día 45 de 0,75 y de los 45 días hasta el final del ciclo productivo de 1. Las plantas tuvieron un libre crecimiento, sin la utilización de podas o deshijas y el manejo fitosanitario se realizó según la presión de enfermedades y plagas, a través de muestreos periódicos.

Para suministrar una cantidad adecuada de nutrimentos en el cultivo, se tomó en cuenta el análisis químico de suelo (cuadros 1 y 2), además se realizó una comparación entre las

recomendaciones basadas en extracciones de materiales de chile dulce en otras localidades (Noronha., 2004., Azofeifa y Moreira., 2005., Terbe et al. 2006). Se utilizaron las cantidades de nutrientes promedio según estas referencias, ajustando el plan de fertilización con el programa Nutrinet (Haifa Group 2021, Anexo 1).

Muestreo y evaluaciones

Se realizaron 10 muestreos durante el ciclo del cultivo, con una frecuencia quincenal iniciando el día del trasplante con el análisis de las plántulas. Los siguientes muestreos se realizaron a los 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 y 135 días después del trasplante. Para cada muestreo se colectaron 2 plantas de cada casa de malla que fueron previamente identificadas. Para los estudios de absorción fue necesario contar con plantas con un desarrollo óptimo, por este motivo se tomó como referencia un diseño pre establecido de muestreo que garantizaba competencias entre las plantas, pero en caso de que la planta seleccionada no presentara dicha condición, se reemplazó por la mejor planta cercana con competencia completa (Ver anexo 2).

Para la parcela útil se tomaron plantas distribuidas en los módulos sin tomar en cuenta los bordes los cuales estaban conformados por 1 hilera en ambos extremos, así como 2 plantas iniciales y finales de cada una de las hileras. Las plantas muestreadas se fraccionaron según órganos (raíz, tallo, hojas, flores y frutos), se lavaron con agua potable, posteriormente con agua destilada y se realizó la medición de peso fresco de cada uno de los órganos. Para la determinación de peso seco se colocaron en bolsas de papel y se introdujeron en estufa a 70 °C por 72 horas.

Los análisis químicos y de materia seca se realizaron en el laboratorio de suelos, plantas y aguas del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Una vez molida la muestra, se determinó

la concentración de nitrógeno por medio de un autoanalizador Dumas. La concentración de los otros elementos, se realizó mediante la digestión con HNO₃ y determinación por espectroscopía de plasma acoplado inductivamente (Agilent 5800-ICP-OES). Posteriormente utilizando el método descrito por Bertsch (2003), con la fórmula $\text{kg nutriente/ tejido/planta} = \frac{\text{PS tejido (kg.planta}^{-1}) \times \text{CN (\%)}}{100}$, se cuantificó la absorción de nutrientes mediante la relación del peso seco y la concentración del nutriente en cada tejido.

Los resultados de biomasa y absorción de nutrientes se relacionaron con la información climatológica de temperatura, proveniente de sensores instalados en los módulos y mediante el modelo de grados días de temperatura acumulada de Ometto según describe Yzarra et al. (2009) con las siguientes fórmulas:

Cuando $T_m > T_b$ y $T_M < T_B$

$$GD = \frac{(T_M - T_m) + (T_m - T_b)}{2}$$

Cuando $T_m > T_b$ y $T_M > T_B$

$$GD = \frac{2(T_M - T_m)(T_m - T_b) + (T_M - T_m)^2 - (T_M - T_B)^2}{2(T_M - T_m)}$$

GD = Grados días

TM = Temperatura máxima diaria

Tm = Temperatura mínima diaria

Tb = Temperatura base mínima

TB= Temperatura base máxima

Las condiciones climáticas que prevalecieron durante el desarrollo de la investigación fueron obtenidas mediante sensores colocados dentro de los sistemas de ambiente protegido. Se consideró 10 °C como temperatura base mínima y 35 °C como temperatura base máxima del cultivo de chile dulce (Maynard y Hochmuth 2007., Urban 1997). Con los datos de peso seco por tejido y etapa fenológica se calcularon parámetros fisiológicos y morfológicos según las fórmulas siguientes (Barrera et al. 2010).

Fisiológicos

$$TCR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{(T_2 - T_1)}$$

$$TAC = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$$

Donde

TCR: Tasa de crecimiento relativo

TAC: Tasa absoluta de crecimiento

W: Peso

T: Tiempo

LnW1: log.nat peso inicial

LnW2: log.nat peso final

Morfológicos

$$RPF = \frac{PS \text{ del follaje}}{PS \text{ total planta}}$$

$$RPC = \frac{PS \text{ parte comercial}}{PS \text{ total planta}}$$

Donde:

RPF: Razón de peso foliar

RPC: Razón de peso comercial

PS: Peso seco

El rendimiento productivo se obtuvo muestreando 12 plantas en cada módulo de casa de malla, distribuyéndose 3 plantas en cada una de las 4 hileras centrales (Ver anexo 2). El análisis de la información se realizó por medio de estadística descriptiva, calculando las medias de las muestras para la construcción de gráficos que representan el crecimiento y absorción de nutrientes (Bertsch 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Grados días de temperatura

La temperatura es uno de los factores que influye en el crecimiento del chile dulce y normalmente el rango óptimo oscila entre 21 - 33 °C (Thuy y Murakami 2015). El estrés que se genera en las plantas ya sea por bajas o altas temperaturas, puede influir en la productividad y adaptación de los cultivares lo que afecta su desarrollo y producción (Cross et al. 2003). Los resultados de este estudio se describen en relación con grados días de temperatura acumulada (GDTA); este método tiene el propósito de generar una predicción del comportamiento del ciclo y la absorción de nutrientes del cultivar en otras localidades o diferentes épocas de producción a través del monitoreo de la temperatura diaria (Yzarra et al. 2009).

La figura 1, muestra los grados días y el porcentaje de acumulación obtenido por el híbrido Polaris según etapa fenológica. En total se requirió un aproximado de 2767 grados días de temperatura para completar el ciclo de evaluación (135 DDT). Las etapas de reproducción y cosecha fueron las que presentaron una mayor demanda (35 y 42 % respectivamente). Asimismo, la cosecha inició a los 1604 GDTA (75 DDT) aspecto importante debido a que en la región existen zonas productoras con condiciones climáticas distintas que pueden modificar el tiempo requerido en cada una de las etapas fenológicas.

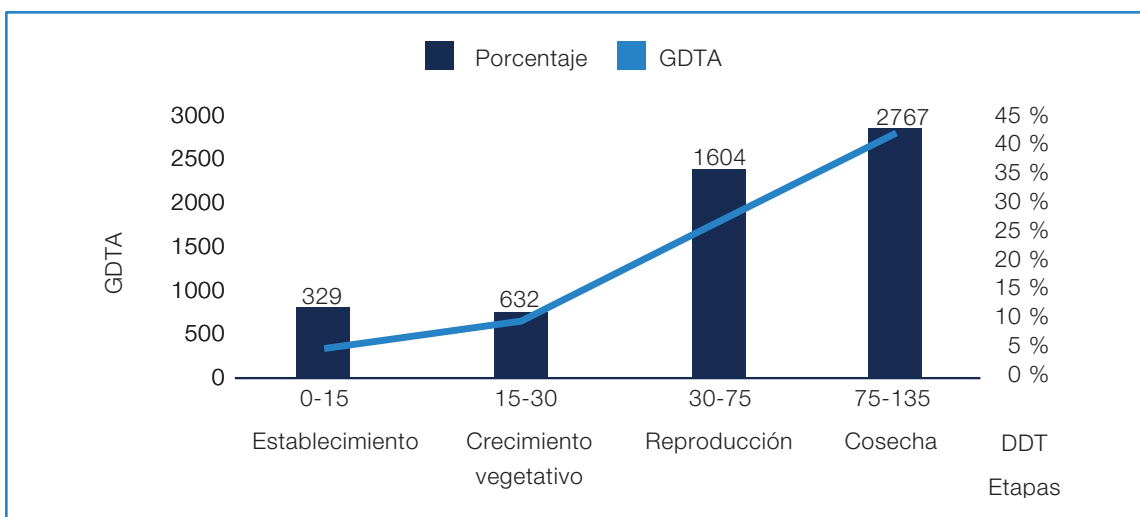


Figura 1. Grados días de temperatura acumulada y porcentaje requerido según etapa fenológica del híbrido Polaris, Cañas, Guanacaste, 2021.

Biomasa seca

La fenología del cultivo de chile dulce se destaca en la región por cuatro etapas principales: establecimiento (trasplante), crecimiento vegetativo, reproducción (que incluye la floración y el desarrollo de frutos) y la cosecha. Después del establecimiento y crecimiento vegetativo que acumuló 632 GDTA, la planta condujo la etapa de reproducción hasta los 1604 GDTA (Figura 2). Posteriormente inició la cosecha donde los valores máximos de biomasa seca en esta etapa se logran a los 1604 y 2275 GDTA con 26,6 y 24,1 % respectivamente.

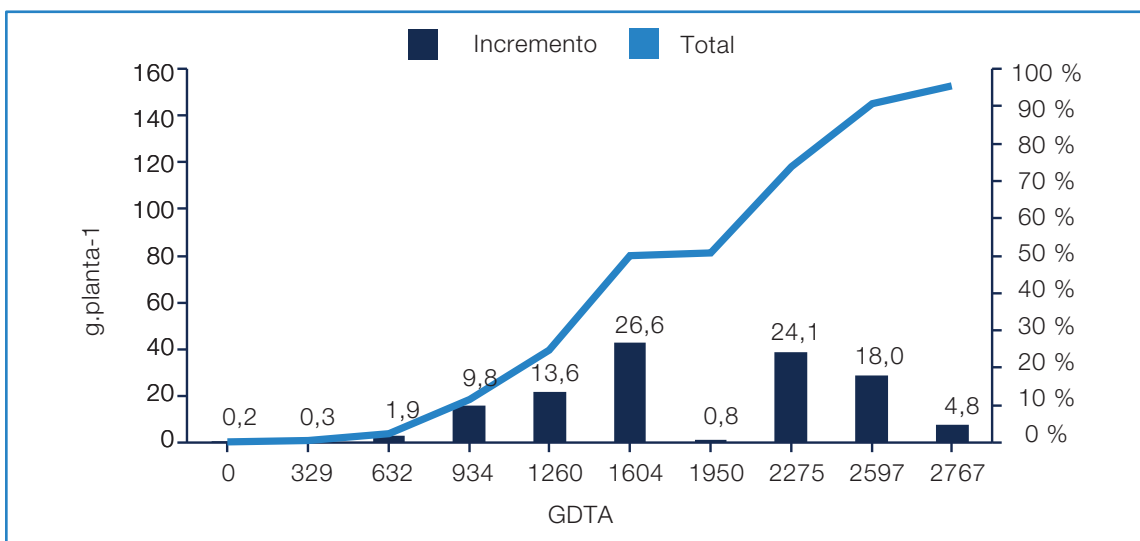


Figura 2. Biomasa seca total de la planta de chile dulce del híbrido Polaris y porcentaje de incremento durante su ciclo de desarrollo, Cañas, Guanacaste, 2021.

Todos los órganos presentaron hasta la etapa de crecimiento un desarrollo lineal en la producción de peso seco (1260 GDTA) y posteriormente hasta la finalización de la cosecha, fluctuaciones en el tiempo, con picos y mermas asociados a la acumulación de biomasa. En la etapa de reproducción como de cosecha, las flores y los frutos obtuvieron el mayor peso seco en casi todas las evaluaciones, con excepción de las de los muestreos realizados a los 1950 y 2597 GDTA en donde

los tallos y hojas superaron a estos órganos; esto concuerda con Azofeifa y Moreira (2008), quienes también observaron una disminución en el crecimiento de las plantas a partir de la aparición de los frutos producto de un cambio en la distribución de nutrientes. El órgano que acumuló mayor peso seco fue la hoja en las etapas de establecimiento y crecimiento vegetativo (0-632 GDTA), llegando a valores superiores del 50 % (Figura 3).

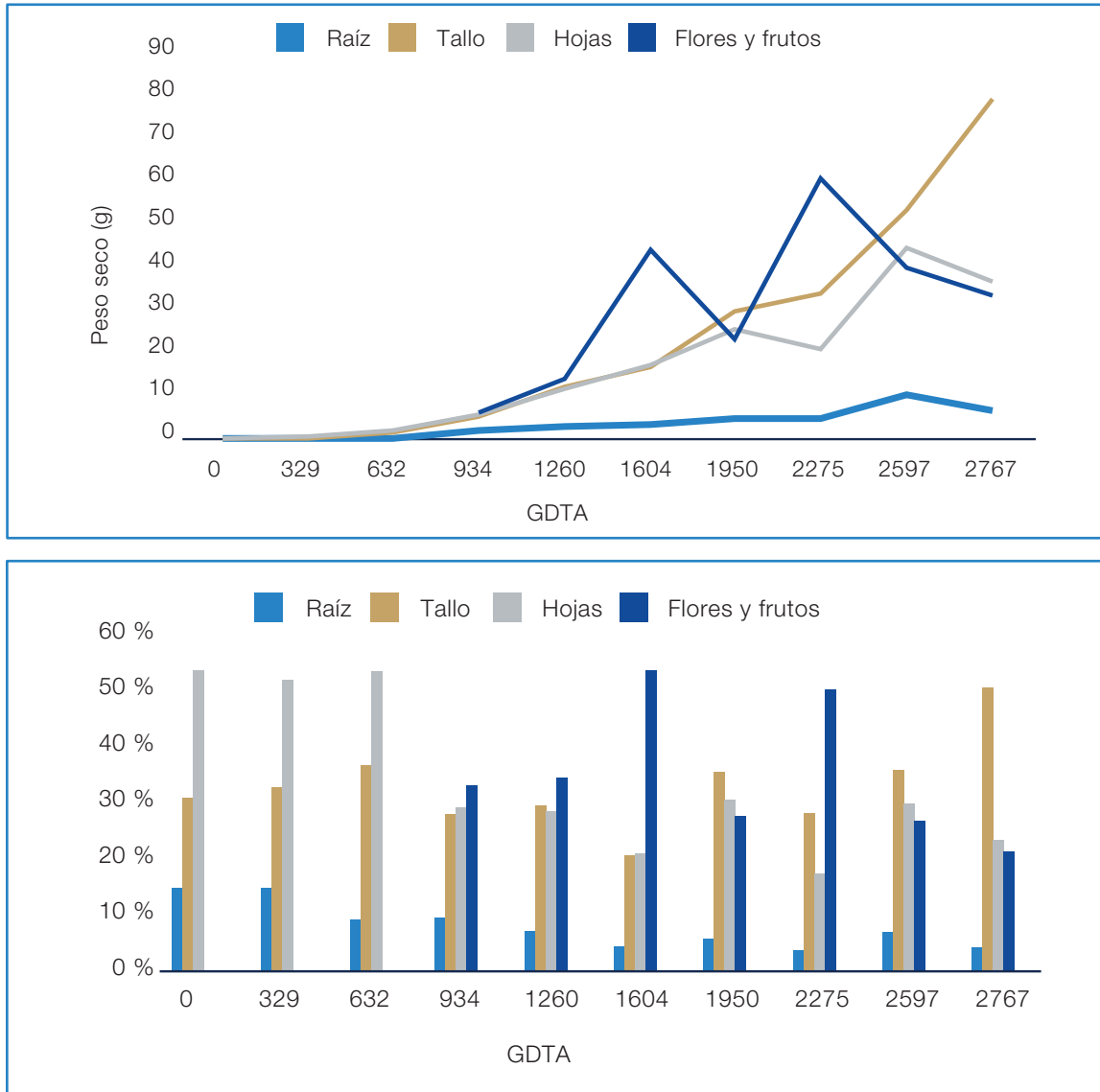


Figura 3. Curva de biomasa seca y porcentaje de peso seco por órgano respecto al peso seco total de la planta de chile dulce híbrido Polaris, durante su ciclo de desarrollo, Cañas, Guanacaste, 2021.

Parámetros fisiológicos y morfológicos

Razón de peso foliar y comercial

En la figura 4 se presentan los parámetros morfológicos referentes a la distribución de biomasa seca en la planta. Como se observó en la figura 3, la planta invierte más del 50 % en las primeras etapas para el crecimiento del follaje. Posteriormente, existen cambios en el crecimiento de este órgano durante todo su ciclo, lo cual podría ser regulado por prácticas de arquitectura de la planta, como las podas o deshoje (Casilimas et al. 2012). Asimismo, existen fluctuaciones en la parte comercial que coincide con picos de cosecha y disminuciones que podrían estar influenciadas por las condiciones climáticas, el estado fisiológico de la planta, y un descenso en el peso y tamaño de los frutos. (Ayala 2012).

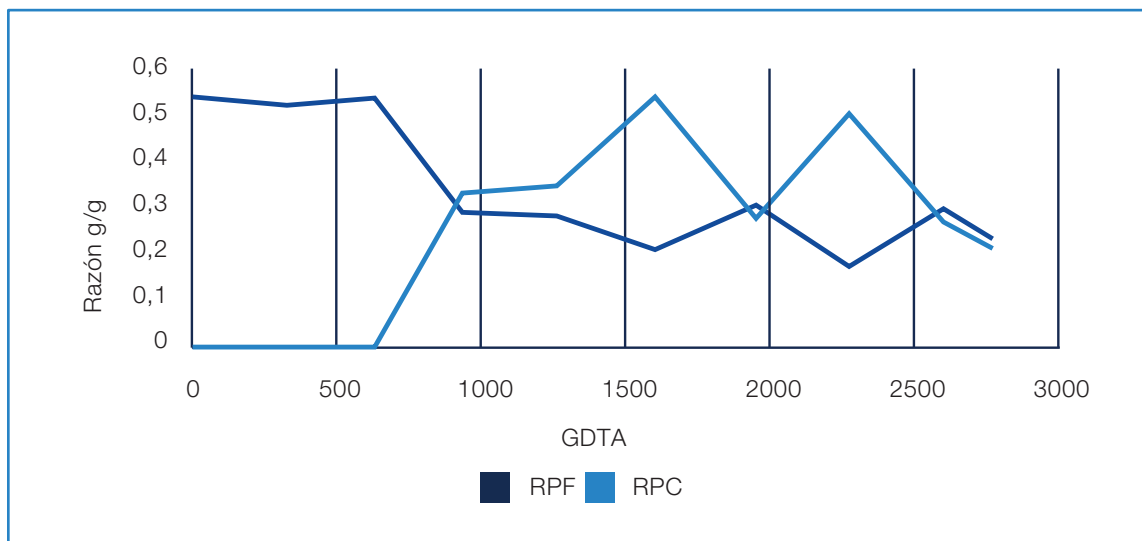


Figura 4. Razón de peso foliar (RPF) y comercial (RPC) de la planta de chile dulce híbrido Polaris, durante su ciclo de desarrollo, Cañas, Guanacaste. 2021.

TCA y TCR

La tasa de crecimiento absoluto está definida como el cambio de tamaño de biomasa seca de una planta obtenido durante un día, mientras que la tasa de crecimiento relativo expresa la variación del tamaño por unidad de tamaño inicial (Hunt 2003., Almanza et al. 2016). Estas medidas permiten explicar la eficiencia de las plantas para acumular materia seca en los diferentes órganos, como resultado de los procesos metabólicos, así como relacionar estas variaciones con la cuantificación nutricional para las propuestas específicas en los programas de fertilización, los cuáles pueden diferir según tecnologías de producción, nutrimento y entre cultivares de la misma especie (Salazar y Juárez, 2013).

En el caso de la TCA, en la Figura 5 se observa que al inicio el incremento fue mínimo, esto podría ser debido a un estrés postrasplante, donde la planta utiliza sus reservas internas y no acumula biomasa (Salisbury y Ross 2000). Después de esta etapa, la planta posee un aumento escalonado hasta la fase de mayor incremento en biomasa seca y pico de producción (1604 GDTA). Posteriormente la planta disminuyó la producción de biomasa debido a que inició un proceso de renovación de tejidos por la inversión energética para la producción de frutos. A los 1604 y 2275 GDTA se obtuvo la mayor cantidad de biomasa seca por día, que coincide con picos máximos de cosecha, donde la planta experimenta un crecimiento activo para el llenado de frutos y una alta tasa de producción de hojas para la producción de fotoasimilados (Almanza et al., 2016).

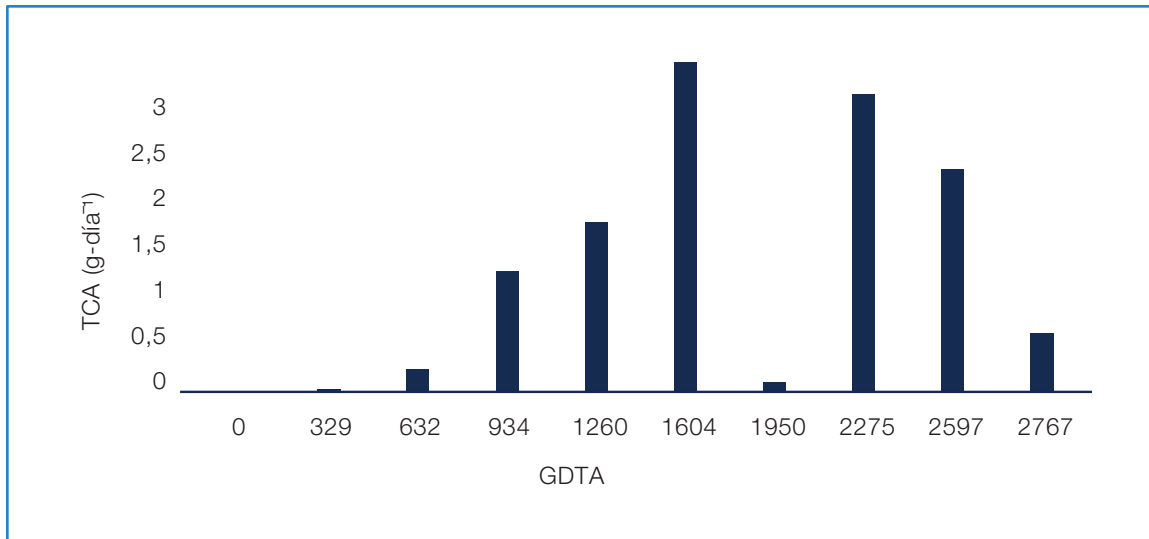


Figura 5. Tasa de crecimiento absoluto (TCA) de la planta de chile dulce híbrido Polaris, durante su ciclo de desarrollo, Cañas, Guanacaste, 2021.

En el caso de la TCR, los mayores valores se alcanzaron entre los 329 y 934 GDTA, con un rango entre 0,06 - 0,11 g/g/día que coincide con la etapa de incremento vegetativo (Figura 6). Posteriormente, la planta posee una disminución en el crecimiento producto de la aparición de órganos reproductivos; estos procesos involucran fenómenos de crecimiento y diferenciación celular que implica el desarrollo coordinado de un gran número de tejidos de la planta (Casierra et al., 2007). Finalmente ocurre una fuerte disminución lo cual podría relacionarse a la senescencia de la planta.

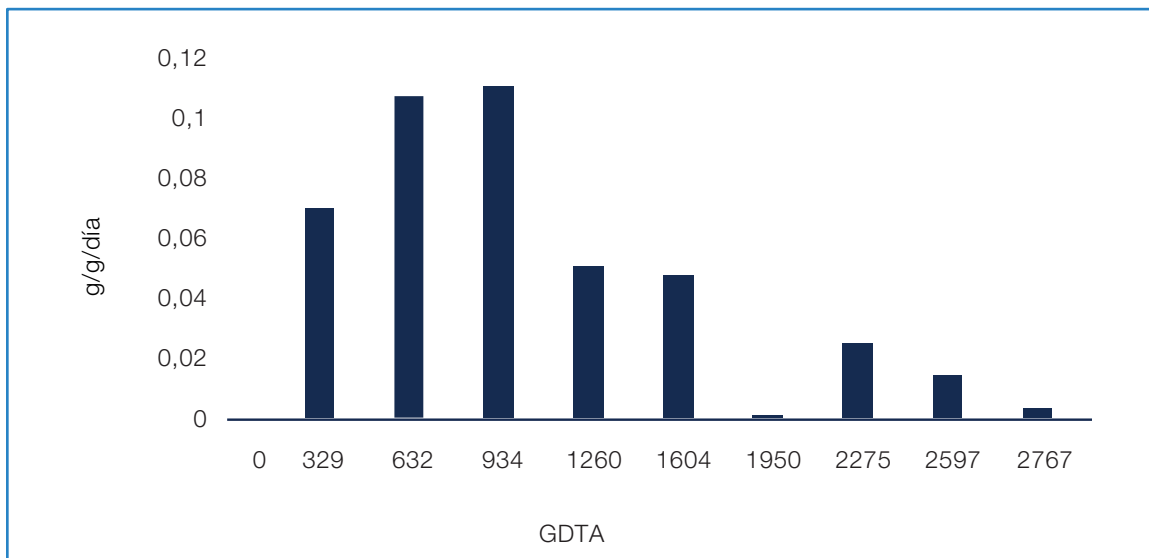


Figura 6. Tasa de crecimiento relativo (TCR) de la planta de chile dulce híbrido Polaris, durante su ciclo de desarrollo, Cañas, Guanacaste, 2021.

Rendimiento productivo

La cosecha empezó a los 75 días después del trasplante, cuando el cultivo obtuvo 1604 GDTA, coincidiendo este inicio con otra investigación que se realizó en el mismo Centro Experimental en el año 2015, utilizando otro híbrido de chile dulce tipo Bell, lo que demuestra que por las condiciones ambientales de la zona, especialmente de luminosidad, existen una mayor precocidad y variaciones en la duración de las etapas fenológicas, comparándolas con las zonas tradicionales de producción de chile dulce que se encuentran en el Valle Central (Ramírez et al; 2018). El ancho y largo promedio de frutos fue de 6,68 y 6,21 cm respectivamente, por lo que la producción se califica según las normas de calidad para exportar a Estados Unidos de Norteamérica como de talla mediana (Carrillo 2016).

Cada planta produjo 11,25 frutos, con peso promedio de 132,88 g/fruto, lo que resultó en un rendimiento por planta de 1 494,96 g, el cual, extrapolado a una hectárea, contemplando una población de 20 800 plantas significó un rendimiento de 31 095,13 kg/ha, (Cuadro 3). Según FAO (2019), este rendimiento superó al promedio mundial de todos los tipos de chile (*Capsicum annum*) obtenido en el año 2018 el cual fue de 18 470 kg/ha y también al alcanzado en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez ubicada en la provincia de Guanacaste durante la temporada de investigación desarrollada en el año 2020, utilizando cultivares de chile dulce tipo Bell en casa de malla con 26 432 kg/ha (Ramírez 2021).

Cuadro 3. Valores promedios de largo y ancho de fruto; Así como rendimiento por planta y por hectárea.

Ancho de fruto (cm)	Largo de fruto (cm)	Frutos por planta	Peso de fruto (g)	Rend. por planta (g)	Rend. kg/ha
6,68	6,21	11,25	132,88	1 494,96	31 095,13

La producción total se obtuvo en cuatro cosechas, durante un periodo que comprendió 60 días de las cuales un 57,10 % se alcanzó en la primera y última cosecha, mientras que en la segunda y tercera se obtuvo 18,61 y 24,29 % respectivamente, por lo que se infiere que la distribución de la producción no es homogénea (Figura. 7). Esto se relaciona con la disminución entre los 1604 y 2275 GDTA, donde la planta invierte en la producción de fotoasimilados y la recuperación de tejidos por el fuerte agotamiento de la primera cosecha.

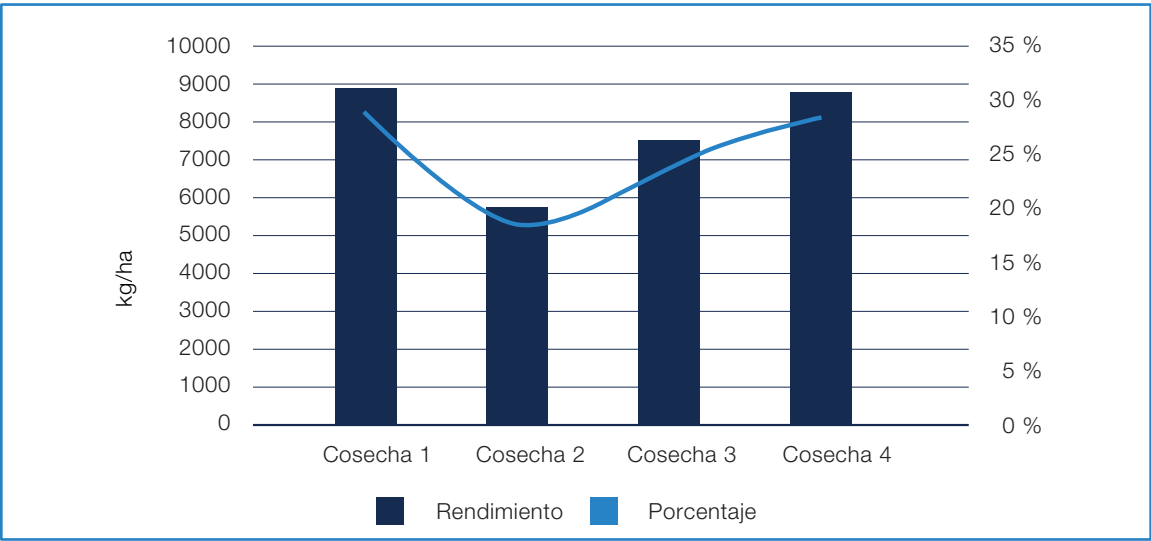


Figura 7. Distribución del rendimiento productivo en kg por hectárea y porcentual por cada semana de cosecha, 2021.

Acumulación de nutrientes

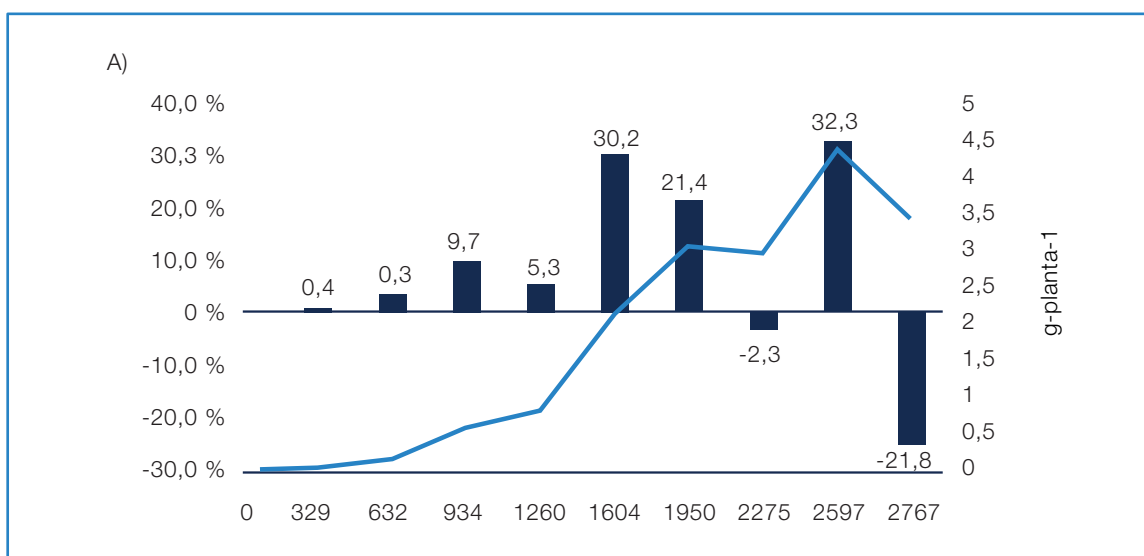
Nitrógeno (N)

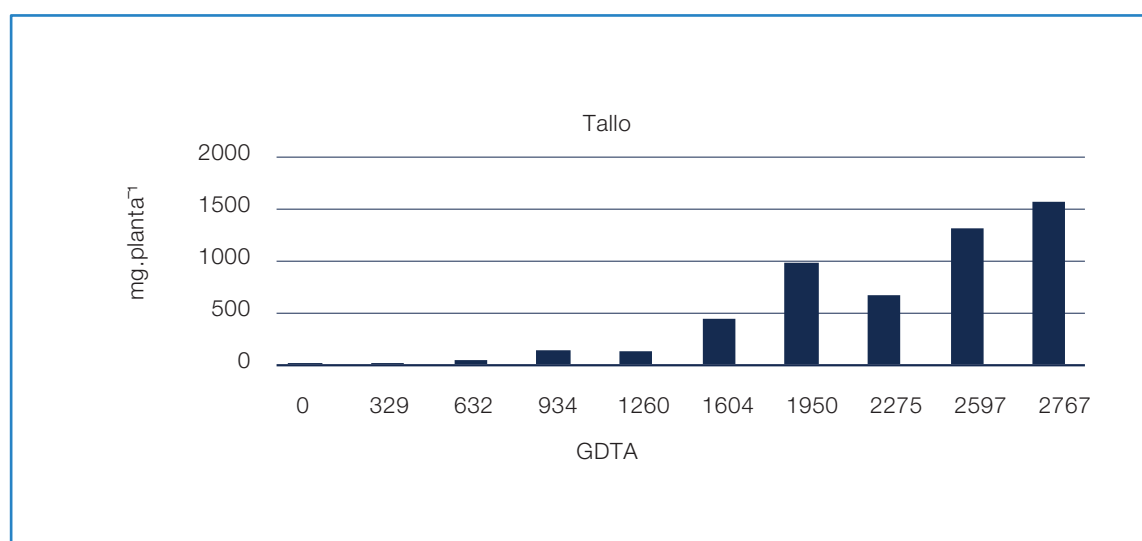
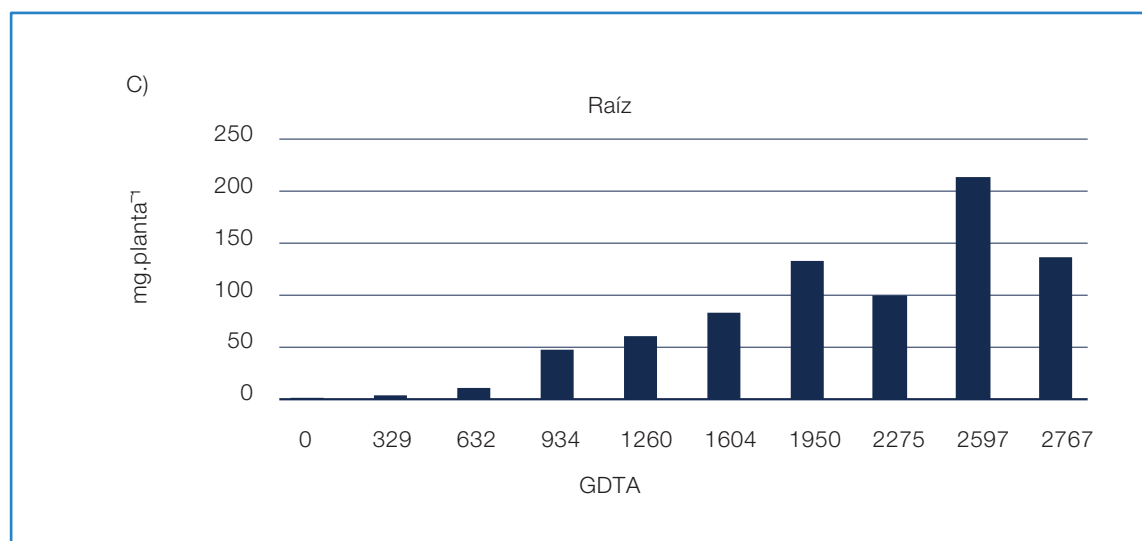
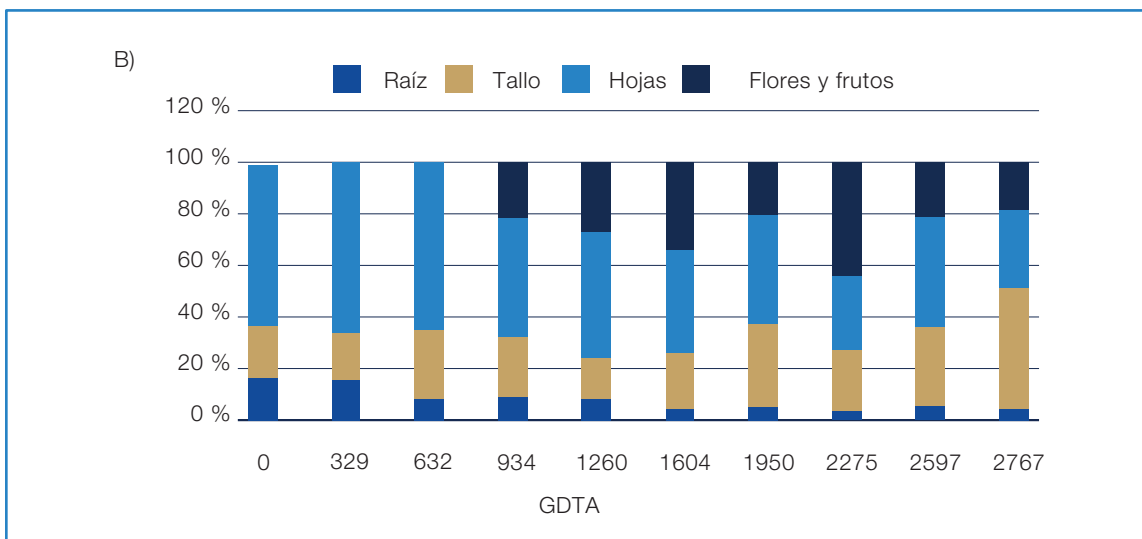
El N es esencial para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas, siendo una parte integral de la estructura y función de las proteínas y los cloroplastos (Barker y Bryson, 2007). La figura 8, muestra la absorción total, el porcentaje de incremento y la distribución de N en los distintos órganos de la planta de chile dulce. En total se acumuló 4,3 g.planta⁻¹ y fue el segundo elemento de mayor absorción, lo que coincide con Fontes *et al.* (2005), quienes encontraron la misma secuencia de extracción, evidenciándose que las etapas de mayor demanda son la reproductiva y de cosecha con 32,3 % de incremento a los 2597 GDTA.

El N es un elemento móvil esencial en la división y expansión celular, así como en el crecimiento de estructuras vegetativas, tales como tallos y hojas (Sonneveld y Voogt, 2009). Las hojas es el órgano que mayor absorbió N con 1851 mg.planta⁻¹ a los 2597 GDTA, y se mantuvo como el de mayor proporción de absorción

durante casi todas las evaluaciones, con excepción a los 2767 y 2275 GDTA que fue superado por el tallo (47 %) y por los órganos reproductivos (44 %) respectivamente. En el caso de la raíz, aunque su acumulación aumenta durante el crecimiento del cultivo hasta los 2597 GDTA inclusive, su proporción no supera el 10 % del total de absorción de la planta a partir de los 632 GDTA.

Terbe *et al.* (2006), también encontraron mayor acumulación de nitrógeno en las hojas, seguido por los frutos y en menor proporción en el tallo y las raíces. Además, estos autores mencionan que la mayor fluctuación fue encontrada en las hojas y en el tallo con valores superiores a 50 % y la menor variación en las raíces, lo cual coincide con este estudio para hojas (29-67 %) y raíces (4-16 %). Según Yasour *et al.* (2013) entre el 32 % y el 64 % del N total removido por las plantas se acumula en los frutos, en el caso de este estudio representó un 30 % del total removido.





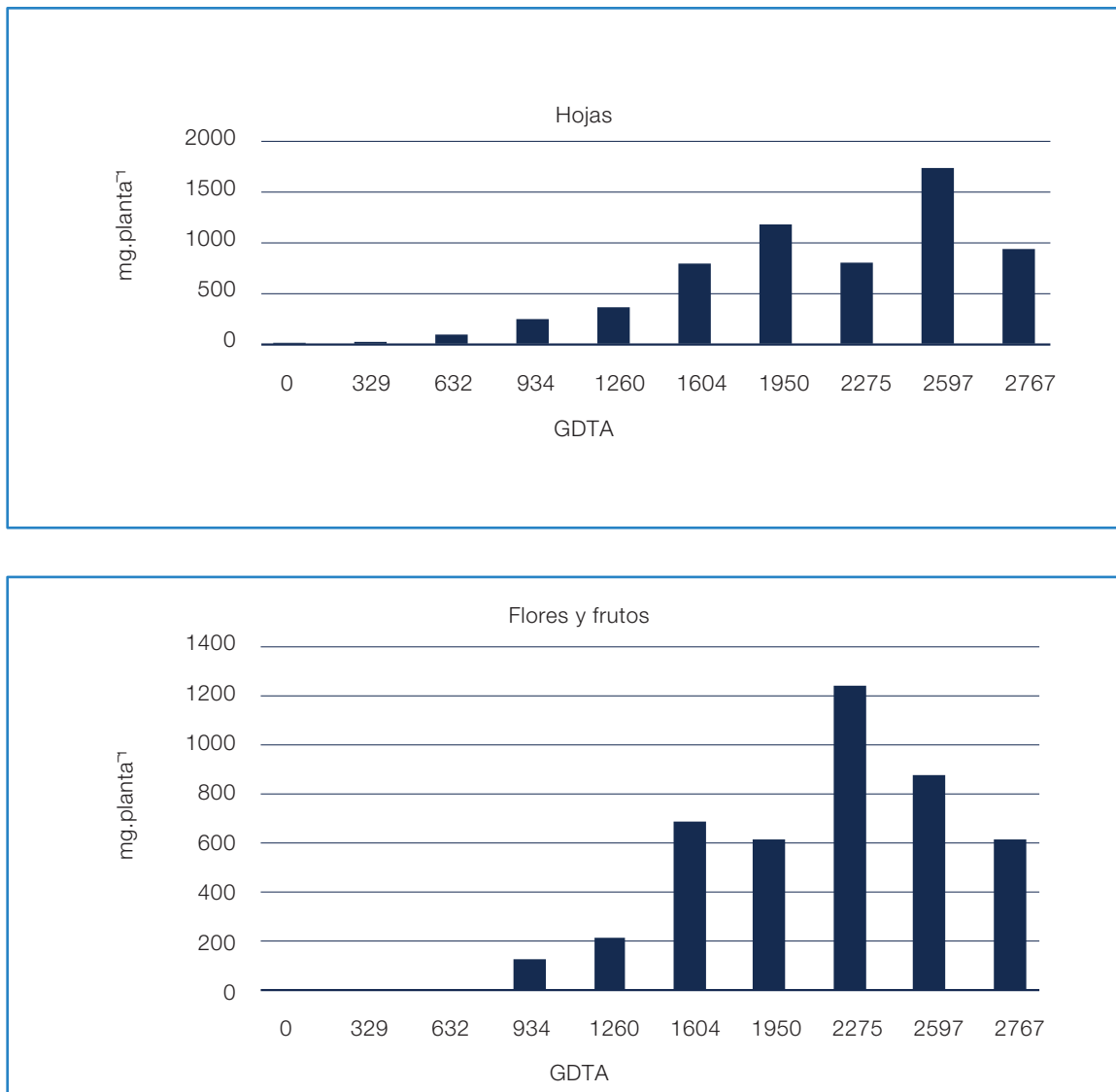


Figura 8. A) Porcentaje de absorción total e incremento de N. B) Distribución porcentual. C) Absorción de N por órgano de la planta de chile dulce, Cañas, Guanacaste, 2021.

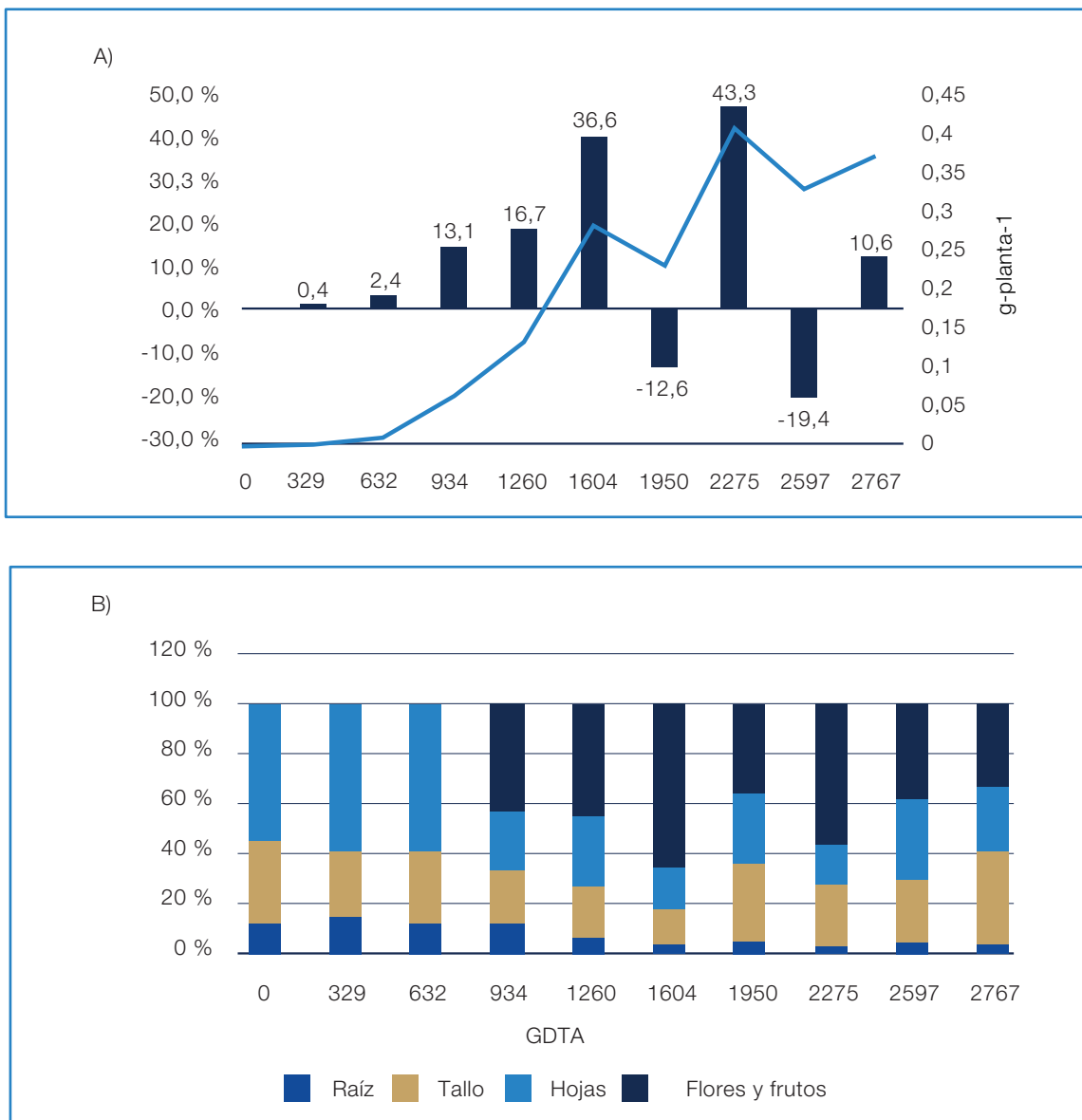
Fósforo (P)

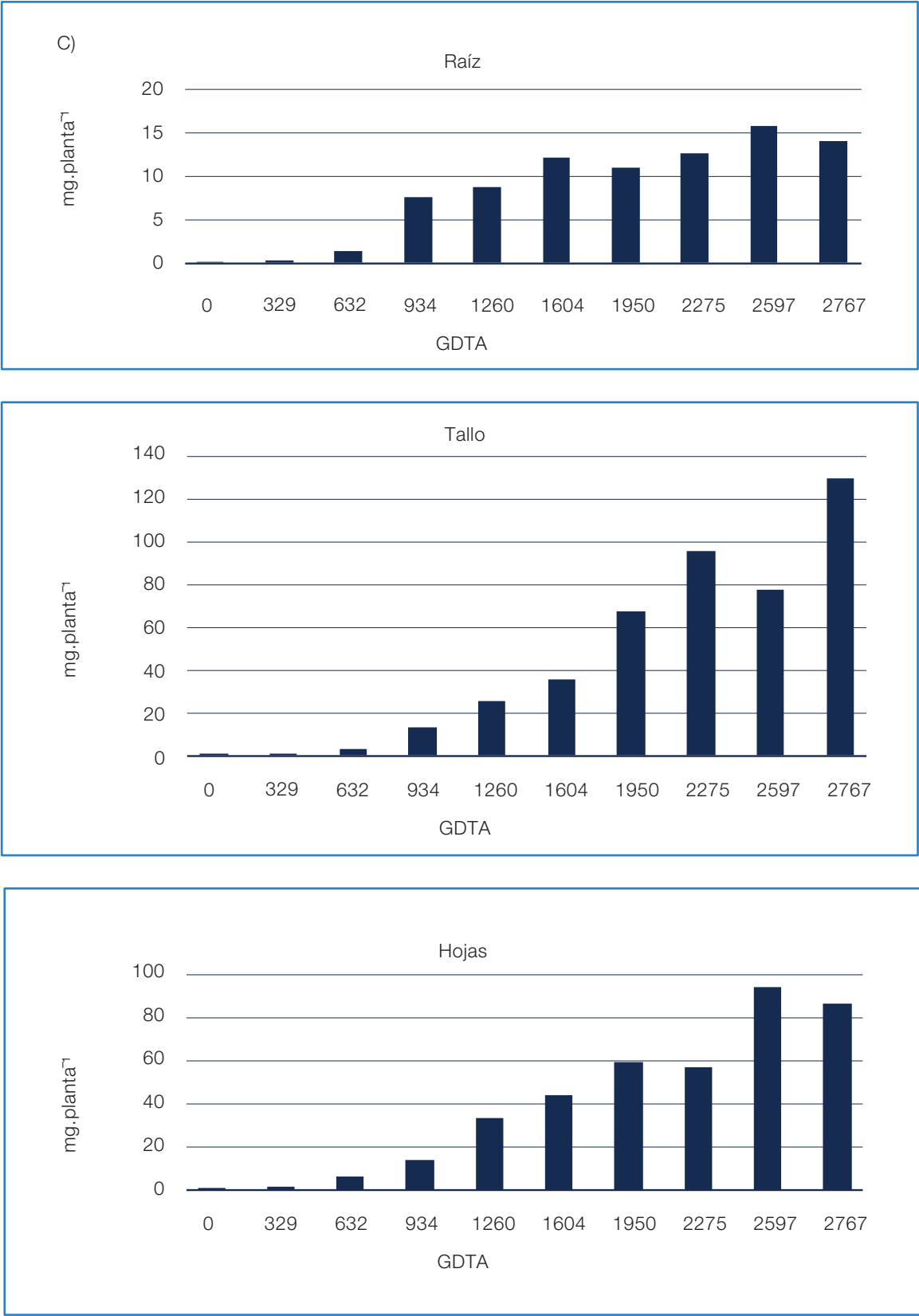
El fósforo está involucrado en la división celular, regulación de enzimas y transformación de azúcares, almidones y transporte de carbohidratos en la planta (Taiz et al. 2015). Los requerimientos de fósforo en las etapas iniciales del cultivo fueron bajos debido a que hasta los 934 GDTA se había acumulado menos de un 20 % del total (Figura 9). El momento de mayor absorción se encontró a los 2275 GDTA (cosecha) con 0,39 g.planta⁻¹ y coincidió con el mayor momento de incremento equivalente (43,3 %).

En la figura 9 se evidencia que este elemento es esencial en la etapa de reproducción (floración), debido a que los momentos de mayor acumulación fueron antes de los dos picos de cosecha. Los órganos de mayor absorción fueron las flores y frutos a los 2275 GDTA con 218 mg.planta⁻¹, y a partir de los 934 GDTA fueron los órganos de mayor proporción de absorción total de la planta hasta el final del ciclo fenológico, que coincide con (Amira et al 2017) quienes determinaron que un aumento en la disponibilidad de P, conduce al crecimiento y mejora el rendimiento del chile dulce en el peso fresco, longitud, diámetro y número de frutos.

El fósforo absorbido por las plantas en diferentes tejidos como tallos, hojas jóvenes y puntos de crecimiento, se encuentran en activa movilidad y contienen altas cantidades de P orgánico en forma de ácidos nucleicos y fosfolípidos (Mengel *et al.* 2001). En este estudio, para el tallo y las hojas, la mayor acumulación ocurrió a los 2767 y 2597 GDTA con 132 y 99 mg.planta⁻¹ y un incremento constante hasta los 2275 GDTA

para el tallo y 1950 GDTA en el caso de las hojas. Posteriormente ocurrió una disminución en ambos órganos y luego un incremento hasta el final del ciclo productivo. En el caso de la raíz se logró una mayor acumulación a los 2597 GDTA con 16,2 mg.planta⁻¹, no obstante desde el establecimiento hasta los 934 GDTA posee una proporción similar del total de absorción de la planta con valores entre los 12 y 15 %.





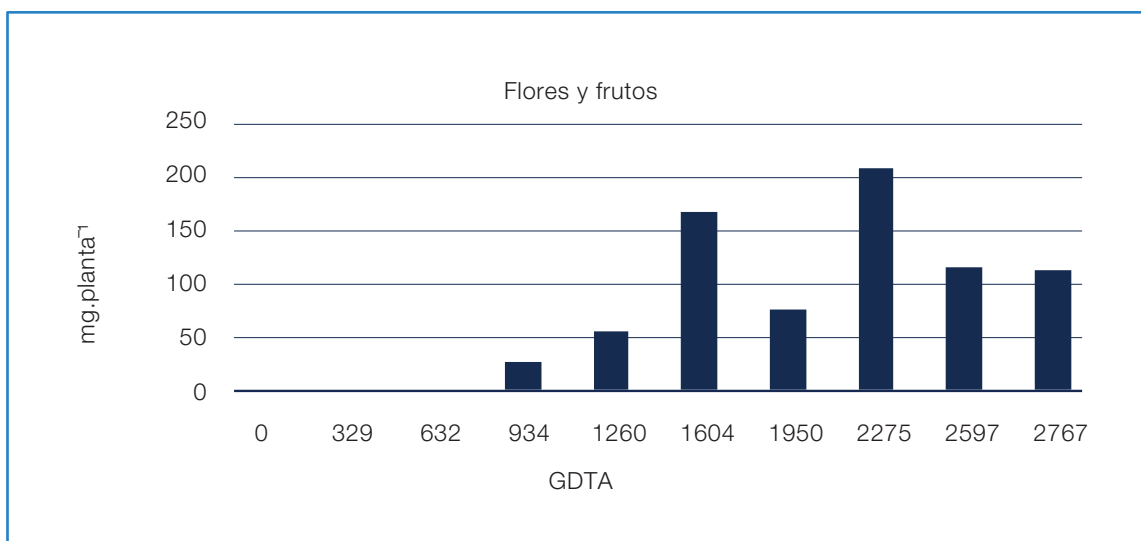
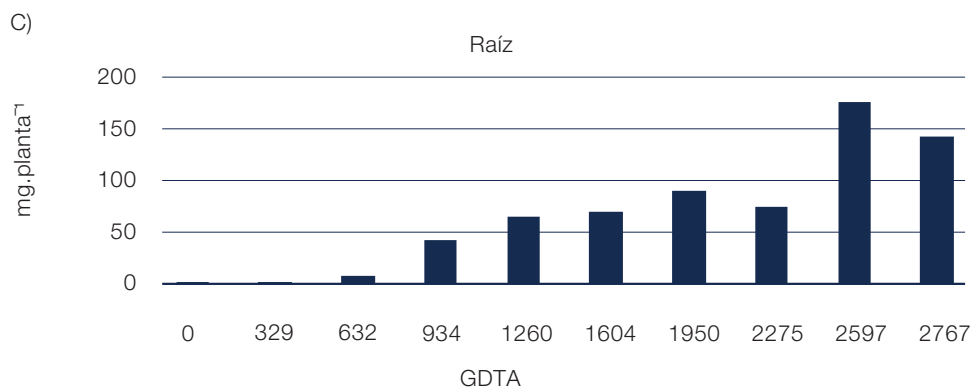
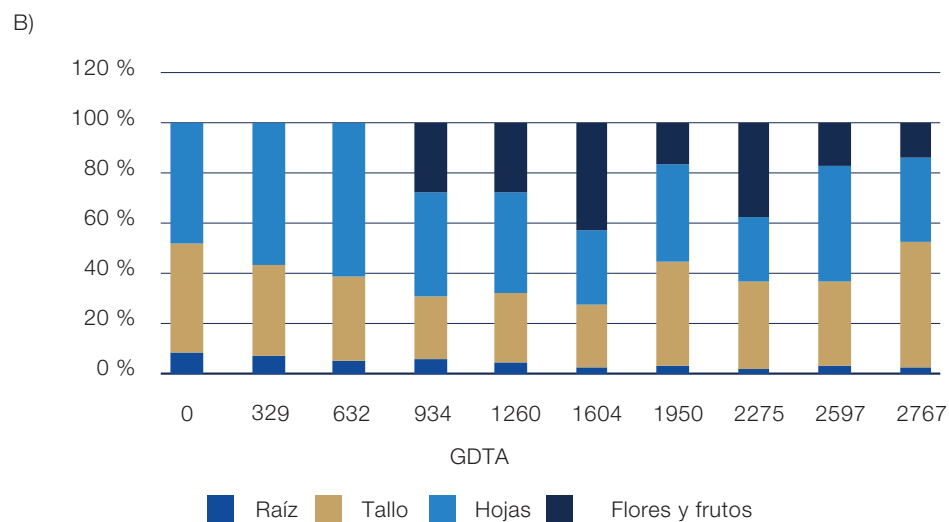
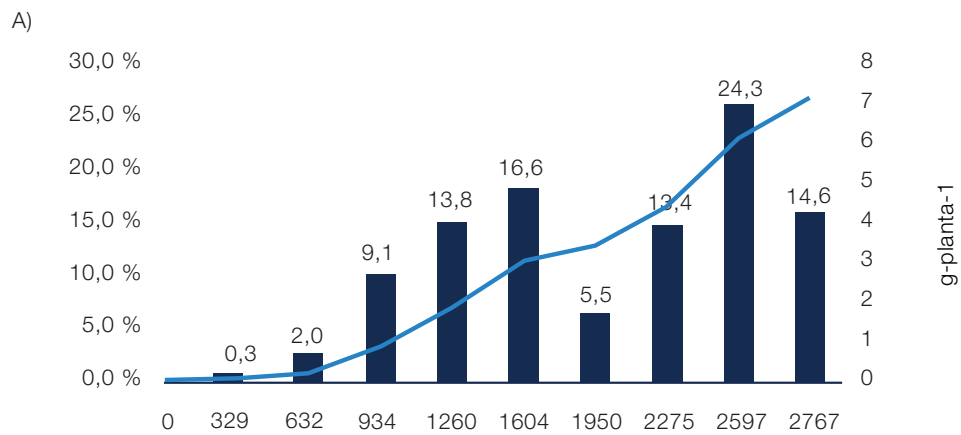


Figura 9. A) Porcentaje de absorción total e incremento de P. B) Distribución porcentual. C) Absorción de P por órgano de la planta de chile dulce, Cañas, Guanacaste, 2021.

Potasio (K)

La absorción de potasio posee un incremento constante hasta el final del ciclo del cultivo inclusive. El momento de máxima absorción ocurrió a los 2767 GDTA con 6,73 g.planta⁻¹. La etapa de cosecha (1604-2767 GDTA) requirió la mayor cantidad de potasio del total con un 57,8 % seguido de la etapa reproductiva con un 39,7 %, mientras que de 0 - 632 GDTA requiere menos de un 3 % del total (Figura 10). El K fue el nutriente extraído en mayor cantidad, debido a los procesos de formación y crecimiento de frutos, los cuales constituyen el principal órgano de demanda en picos de cosecha respecto al total extraído por la planta (Bugarín et al. 2002).

El órgano que más acumuló potasio fue el tallo a los 2767 GDTA con 3401 mg.planta⁻¹, sin embargo, las hojas fueron el segundo órgano más acumulador, poseen la mayor proporción durante el ciclo del cultivo con respecto a los demás órganos y translocan este elemento a los frutos (momentos de máxima acumulación y mayor proporción con 43 y 37 % a los 1604 y 2275 GDTA respectivamente. En el caso de la raíz su mayor proporción fue en la etapa de establecimiento y crecimiento vegetativo con valores entre 5-8 %, con una máxima acumulación 2597 GDTA. Resultados similares encontraron Terbe et al. (2006), quienes tuvieron los mayores valores de potasio en el tallo, seguido del fruto, las hojas y raíces con un rango de fluctuación en cada órgano más alto en comparación con nitrógeno y fósforo.



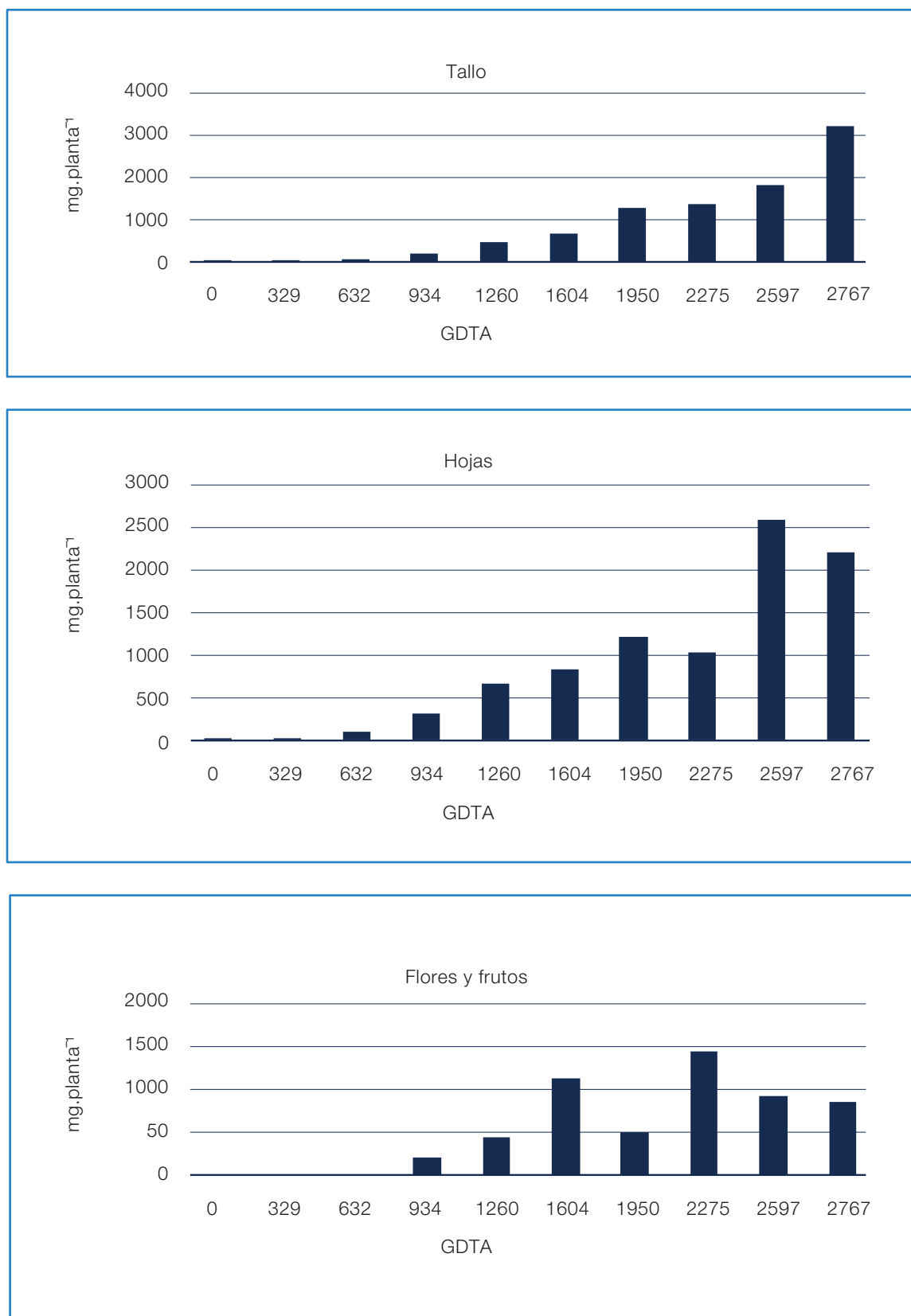


Figura 10. A) Porcentaje de absorción total e incremento de K. B) Distribución porcentual. C) Absorción de K por órgano de la planta de chile dulce, Cañas, Guanacaste, 2021.

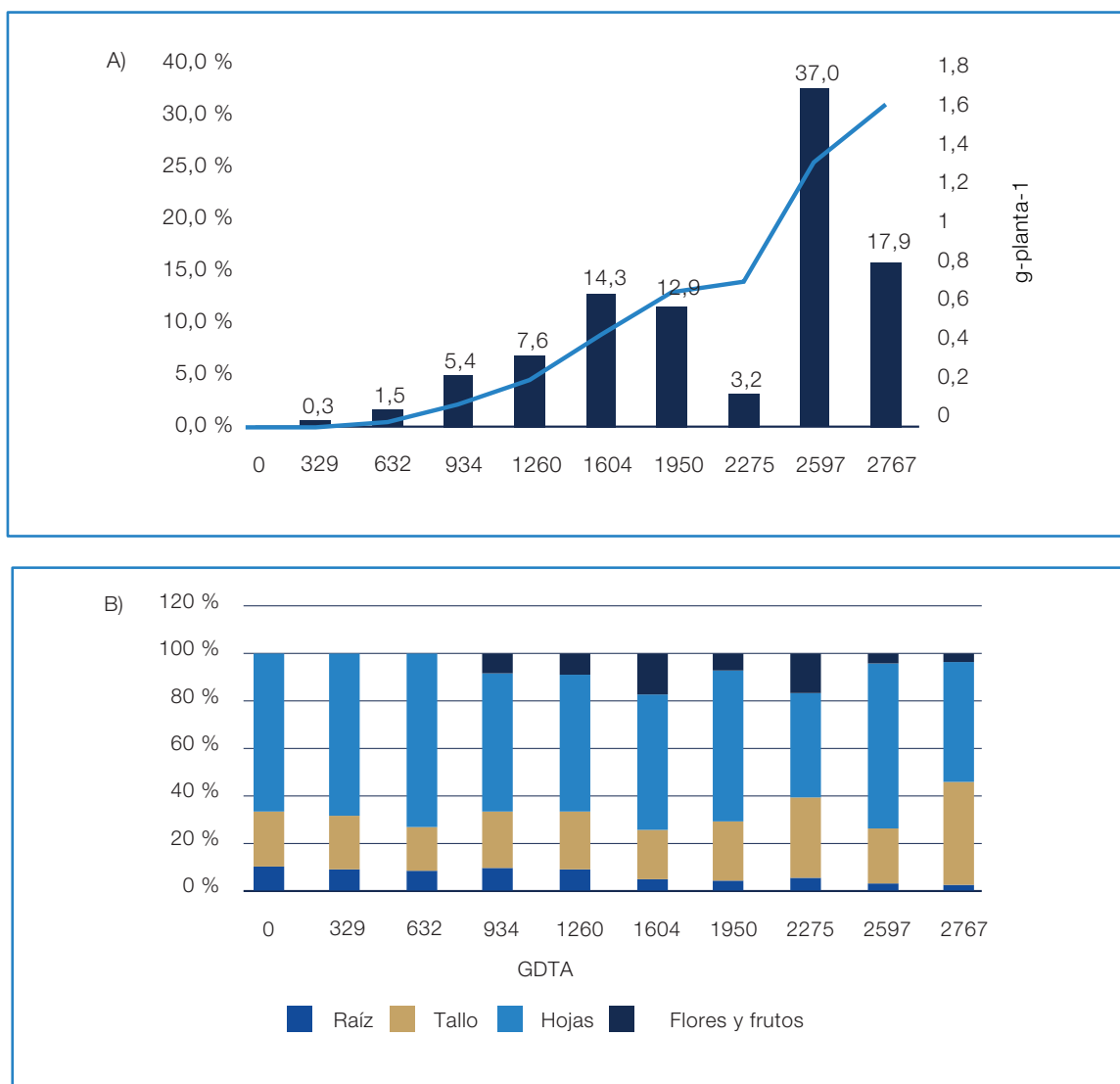
Calcio (Ca)

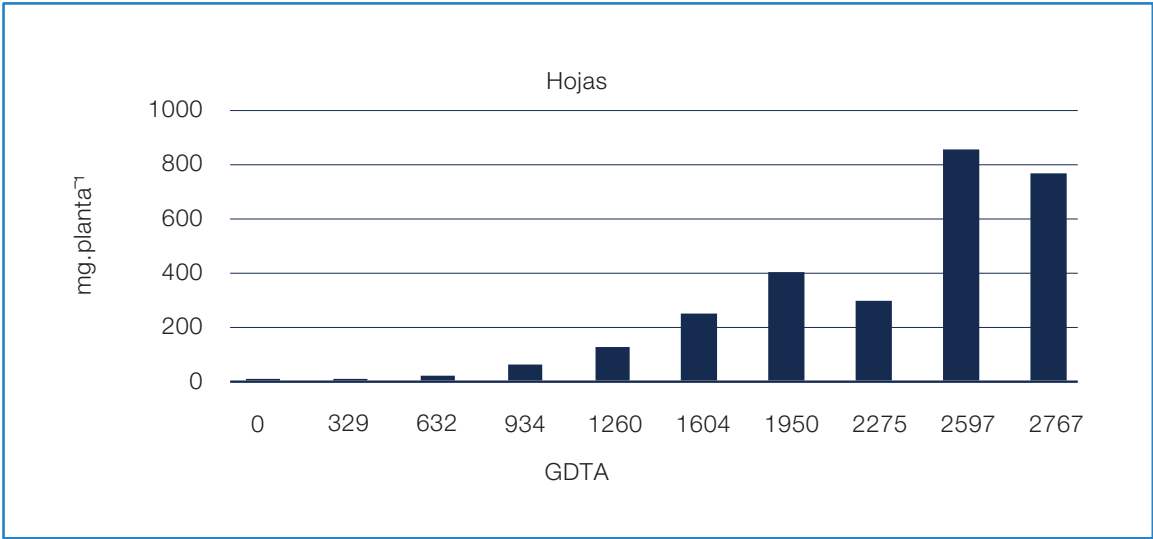
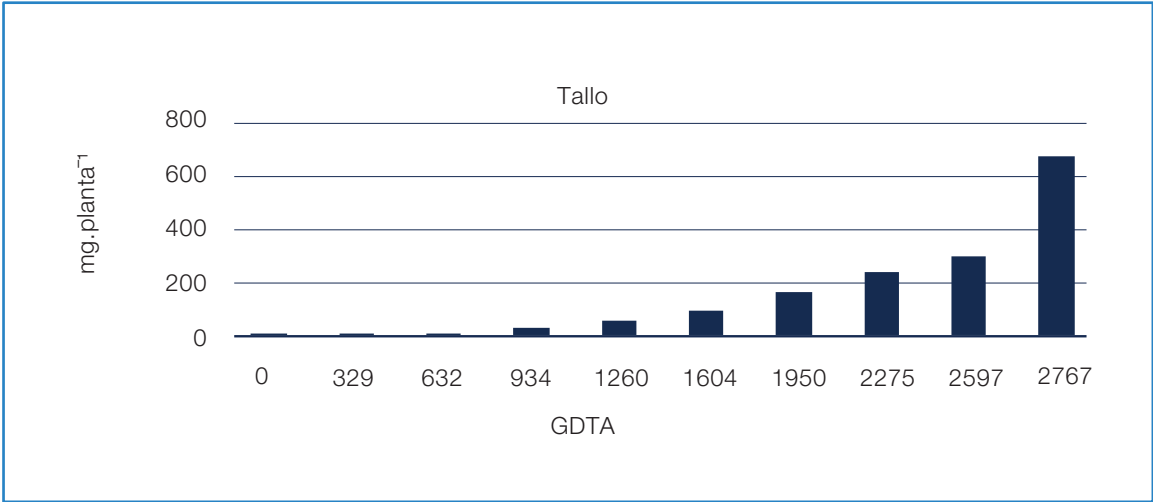
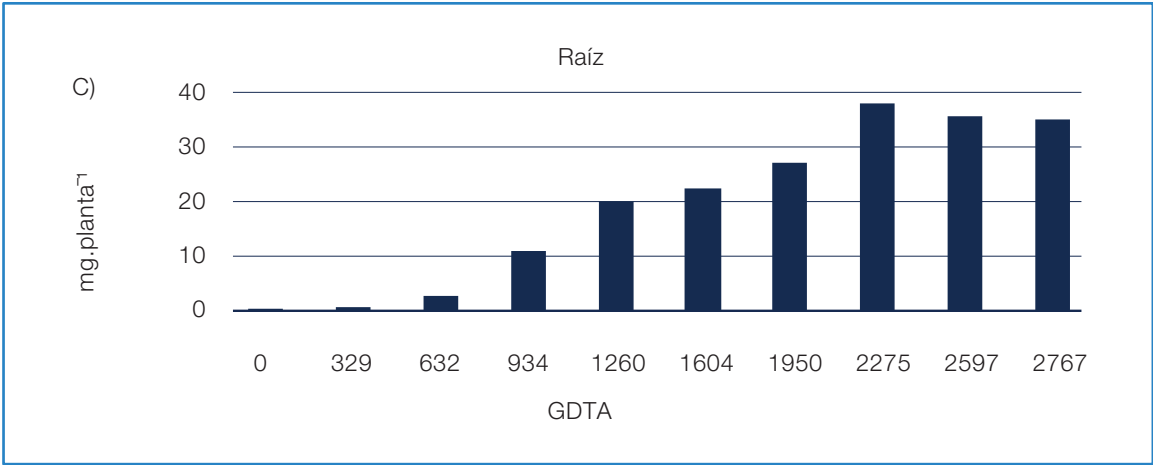
La absorción total de calcio fue de 1,6 g.planta⁻¹ y fue el tercer elemento de mayor demanda en la planta de chile dulce. El calcio es poco móvil y su concentración se incrementó gradualmente durante las fases del cultivo, debido a que participa en proporcionar estabilidad estructural a las paredes y membranas celulares (White y Broadley, 2003). El mayor incremento se logró en la etapa de cosecha entre los 2275 y 2597 GDTA con un 37 % (Figura 11). Cruz *et al.* 2014, también reportaron esta tendencia ascendente de Ca en el crecimiento de plantas de chile dulce.

En adición, la figura 11 muestra que las hojas fue el órgano de mayor absorción y alcanzó el mayor valor a los 2597 GDTA con 916 mg.planta⁻¹, además representó entre un 51 y un 73 % de proporción de absorción de este elemento en

comparación con los demás tejidos de la planta. En la raíz y el tallo, la absorción tuvo un incremento constante a partir de los 632 GDTA y alcanzaron sus valores máximos a los 2275 y 2767 GDTA con 40 y 698 mg.planta⁻¹ respectivamente.

En el caso de las flores y frutos, los momentos de máxima absorción coinciden con los picos de cosecha con valores de 81 y 123 mg.planta⁻¹ a los 1604 y 2275 GDTA respectivamente y podría atribuirse a que participa en regular la absorción, además en el almacenamiento y firmeza de frutos (Alcántar y Trejo 2006). Asimismo, el rápido crecimiento, la integridad estructural de los tallos que contienen flores y frutos, así como la calidad de la fruta producida, está fuertemente ligada con la disponibilidad de calcio (Easterwood 2002).





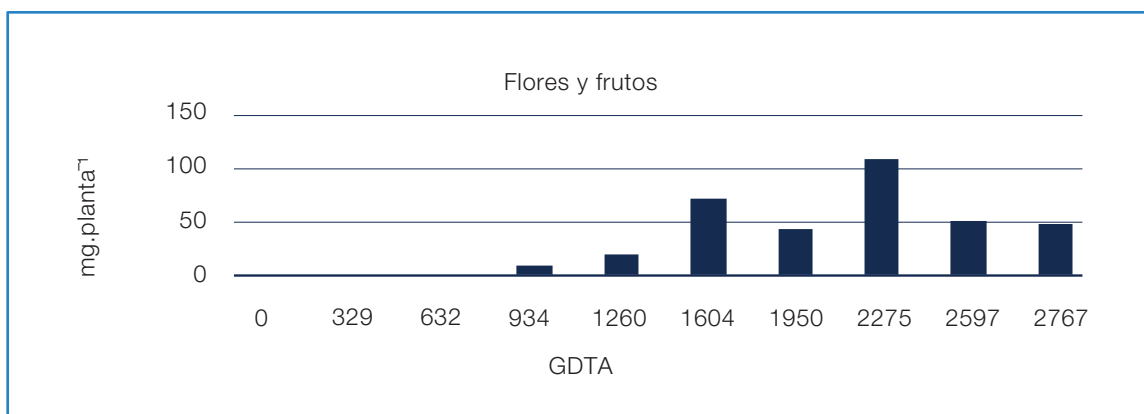
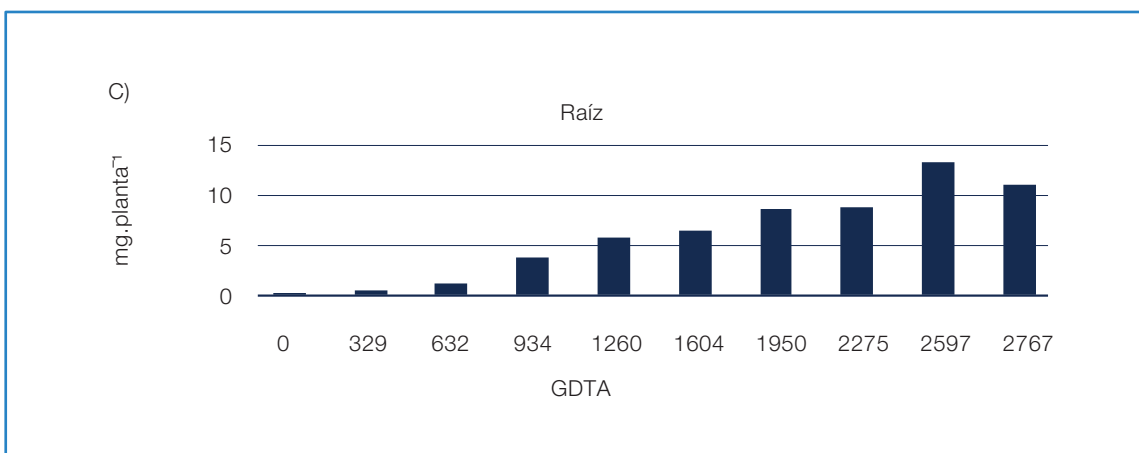
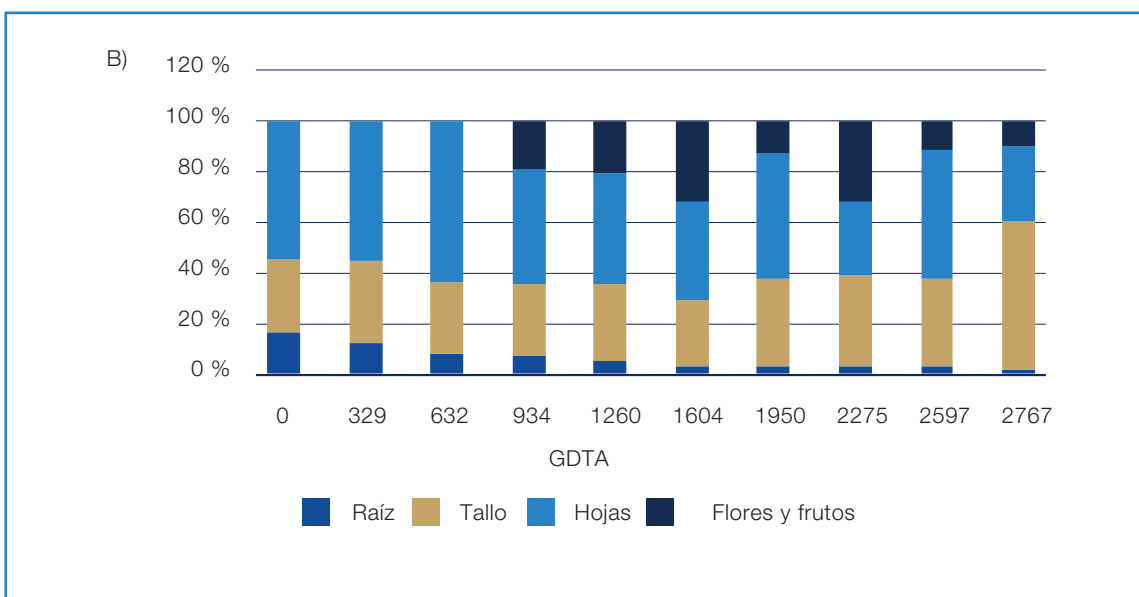
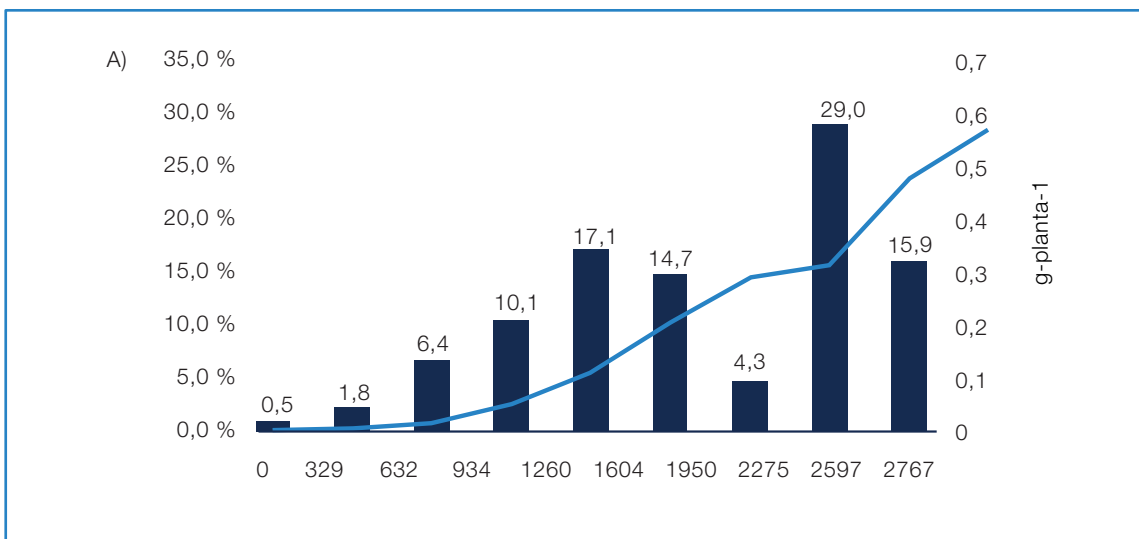


Figura 11. A) Porcentaje de absorción total e incremento de Ca. B) Distribución porcentual. C) Absorción de Ca por órgano de la planta de chile dulce, Cañas, Guanacaste, 2021.

Magnesio (Mg)

El magnesio es la base estructural de la molécula de clorofila y por ende esencial en el proceso de fotosíntesis y fijación de CO₂, además promueve la transferencia, conversión y acumulación de la energía como la síntesis de carbohidratos y proteínas (Cakmak y Yazici, 2010). Durante los primeros 934 GDTA se observa en la figura 12, que la absorción de magnesio fue baja en comparación con las otras etapas del ciclo del cultivo ya que se obtuvo una acumulación de 0,05 g.planta⁻¹, mientras que la máxima fue de 0,6 g.planta⁻¹ a los 2767 GDTA, es decir al final del ciclo productivo. La etapa de reproducción acumula cerca de un 35 % del total de absorción de magnesio, mientras que en etapas de cosecha se acumula cerca de un 64 %, lo que coincide con Azofeifa y Moreira (2005), quienes encontraron la mayor acumulación de Mg cerca del final del ciclo productivo (166 dds).

El tallo es el órgano que más acumuló magnesio con 342 mg.planta⁻¹ a los 2767 GDTA (final del ciclo); en el caso de las hojas (segundo órgano en acumulación), tuvo un incremento constante hasta los 1950 GDTA luego una disminución que coincidió con la mayor absorción de los frutos (101 mg.planta⁻¹) para posteriormente volver a incrementar al valor máximo (247 mg.planta⁻¹). Durante casi todo el ciclo fenológico, las hojas tuvieron la mayor acumulación de Mg a excepción a los 2767 GDTA, esto debido a que en este órgano se sintetiza gran cantidad de clorofila y otros pigmentos al cual está asociado el Mg (Taiz y Zeiger 2010). Por otra parte, la raíz tuvo un incremento constante desde las primeras etapas y alcanzó su valor máximo a los 2597 con 13,5 mg.planta⁻¹.



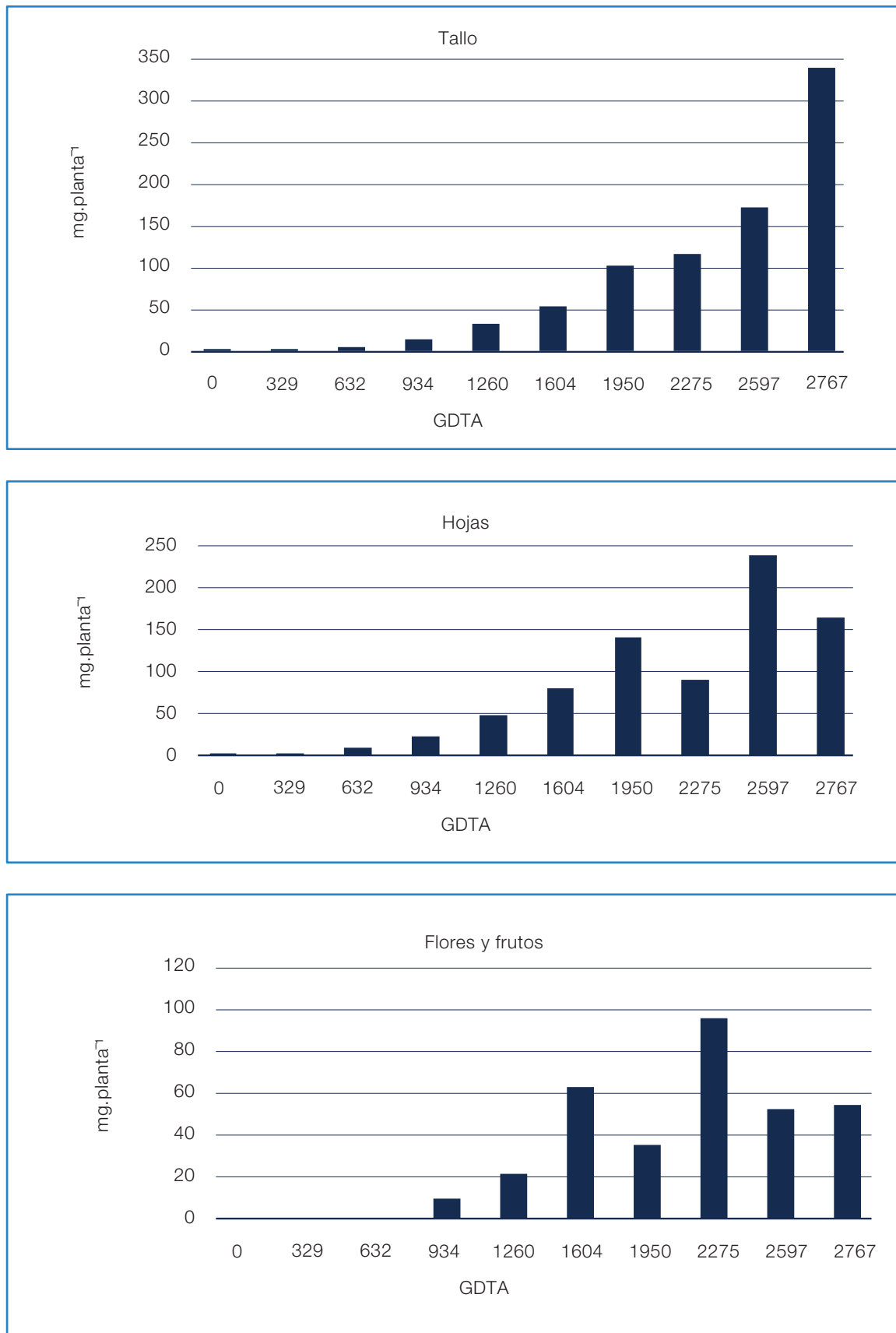


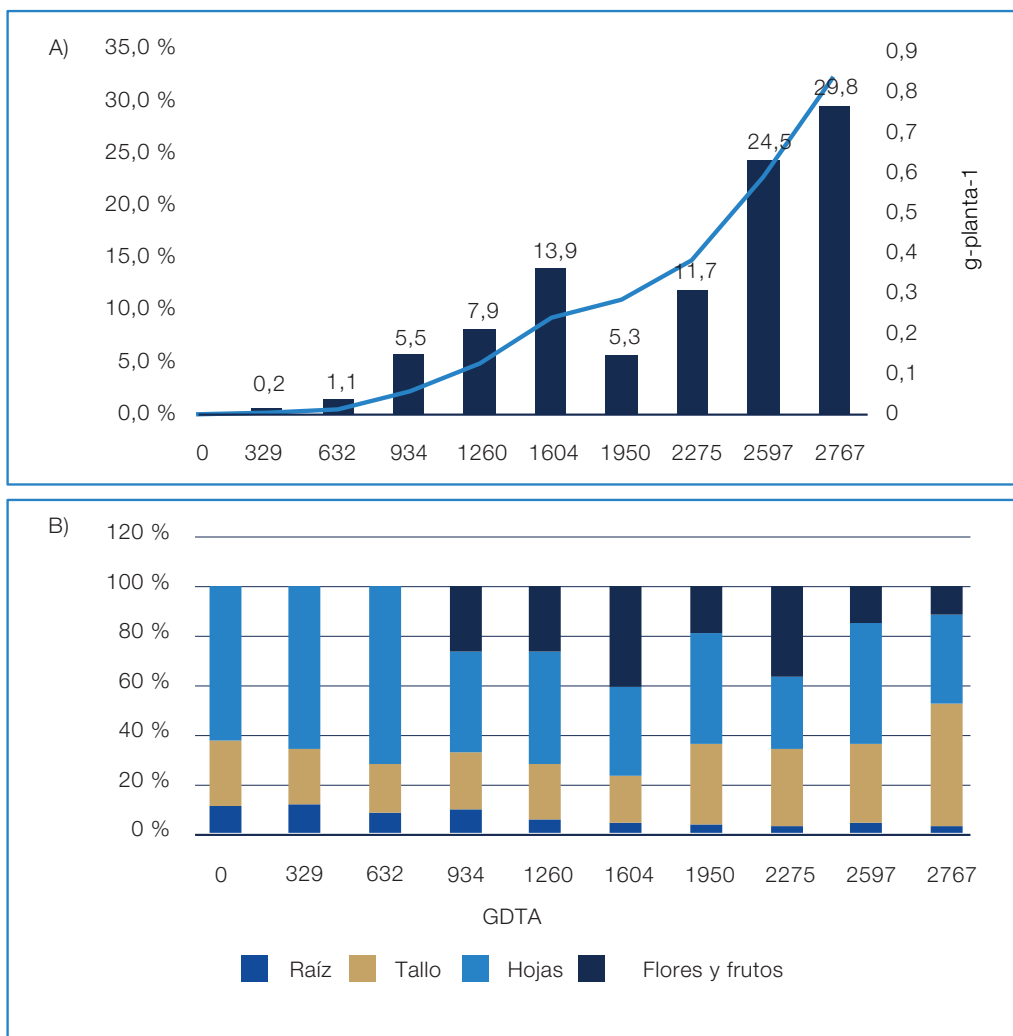
Figura 12. A) Porcentaje de absorción total e incremento de Mg. B) Distribución porcentual. C) Absorción de Mg por órgano de la planta de chile dulce, Cañas, Guanacaste, 2021.

Azufre

La absorción de azufre tuvo un incremento constante hasta el final del ciclo del cultivo inclusive. El momento de máxima absorción ocurrió a los 2767 GDTA con $0,85 \text{ g.planta}^{-1}$ (Figura 13). Desde la etapa de establecimiento hasta reproducción (0-1604 GDTA) se requirió cerca de un 30 % del total de absorción de S en la planta, mientras que la etapa de cosecha (1604 - 2767 GDTA), es la de mayor requerimiento con un 70 %, y coincide con Azofeifa y Moreira (2005) quienes determinaron niveles importantes de absorción al final del ciclo de la planta.

El órgano de la planta más demandante en azufre es el tallo, alcanzando un valor de $424 \text{ mg.planta}^{-1}$ al final del ciclo del cultivo. De la misma manera se comportaron las hojas y las raíces, donde su máxima absorción se alcanzó al final del ciclo con 301 y 26 mg.planta^{-1} .

Las hojas con un rango entre 41 a 72 % del total de la planta representó la mayor proporción de absorción, a excepción del máximo del tallo al final del ciclo, y las flores y frutos a los 1604 y 2275 GDTA con valores de absorción 99 y 143 mg.planta^{-1} que representaron un 41 y 37 % respectivamente en comparación con los demás órganos. Durante el constante crecimiento vegetativo del cultivo, se requiere mayor cantidad de azufre, debido a que participan en múltiples procesos biológicos como la fotosíntesis, la generación de energía, el metabolismo y las reacciones; el S es constituyente de hormonas, vitaminas y ciertos aminoácidos los cuales hacen parte de los bloques donde se forman las proteínas (Narayan *et al.*, 2022; Jiménez 2017).



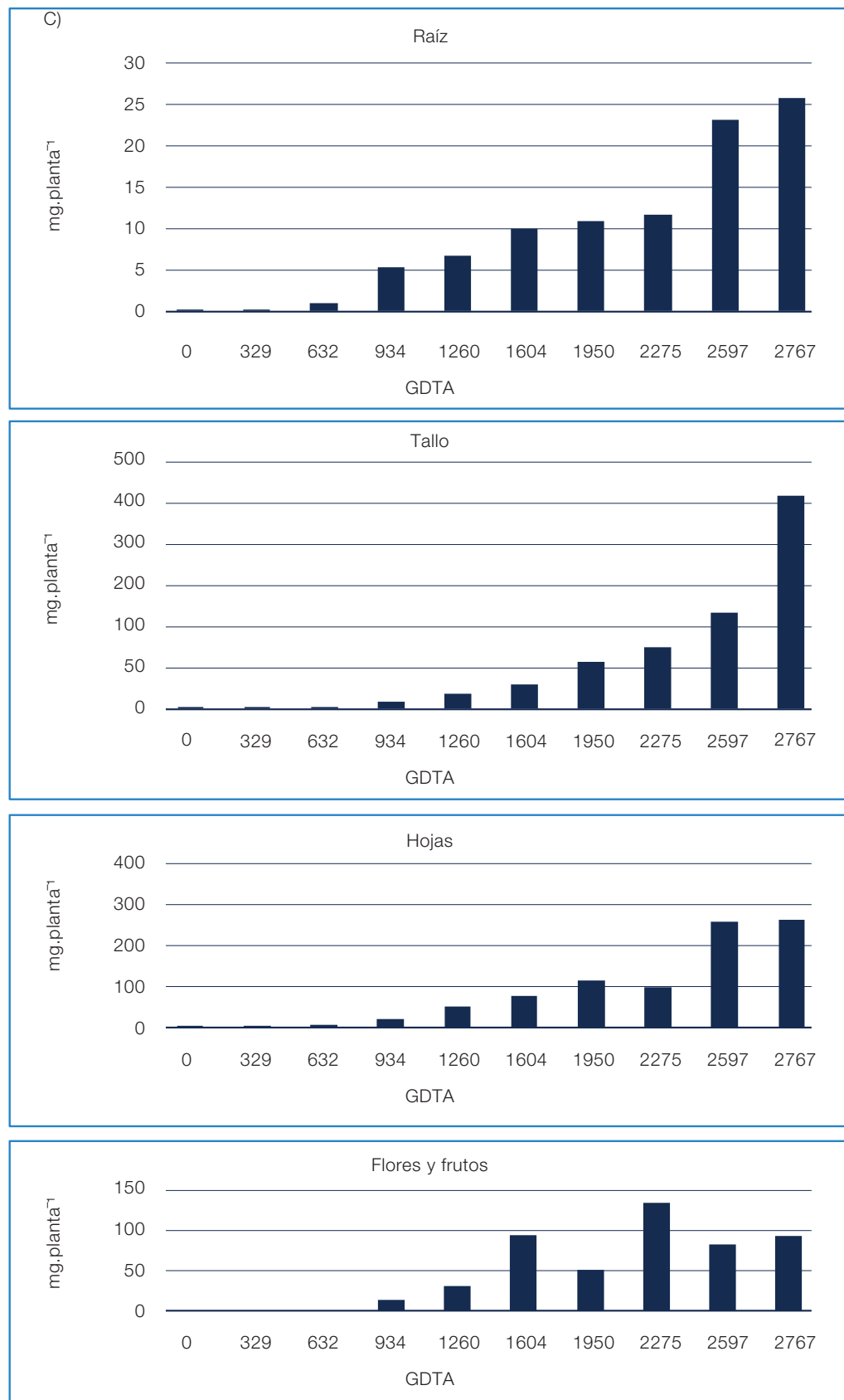


Figura 13. A) Porcentaje de absorción total e incremento de S. B) Distribución porcentual. C) Absorción de S por órgano de la planta de chile dulce, Cañas, Guanacaste, 2021.

Acumulación de nutrientes

En el cuadro 4 se presentan los valores de absorción total de cada nutrimento durante el ciclo de crecimiento de las plantas. La absorción de K fue de 6,74 g.planta⁻¹, equivalente a 168 kg.ha⁻¹ de K₂O. Luego en orden decreciente, le siguieron el N con 4,31, el Ca con 1,61, el S con 0,85, el Mg con 0,58 y el P con 0,38 g.planta⁻¹ respectivamente, que equivalen a 90, 47, 53, 20 y 18 kg.ha⁻¹ de N, CaO, SO₄, MgO y P₂O₅ respectivamente.

Cuadro 4. Absorción de nutrimentos (g.planta⁻¹) en plantas de chile dulce durante su ciclo de crecimiento, Cañas, Guanacaste, 2021.

GDTA	DDT	N	P	K	Ca	Mg	S
0	0	0,004	0,001	0,009	0,001	0,001	0,001
329	15	0,022	0,002	0,027	0,005	0,004	0,002
632	30	0,150	0,011	0,163	0,029	0,015	0,011
934	45	0,565	0,062	0,777	0,115	0,051	0,058
1260	60	0,793	0,127	1,705	0,237	0,110	0,125
1604	75	2,092	0,269	2,838	0,467	0,209	0,244
1950	90	3,015	0,220	3,212	0,674	0,295	0,289
2275	105	2,915	0,388	4,118	0,726	0,320	0,389
2597	120	4,305	0,313	5,752	1,321	0,488	0,598
2767	135	3,366	0,354	6,737	1,609	0,580	0,851
Total		4,305	0,388	6,737	1,609	0,580	0,851

Las mayores tasas absolutas de extracción de N y P ocurrieron a los 2597 y 2275 GDTA respectivamente y para K, Ca, Mg y S a los 2767 GDTA (Cuadro 4), momento en que la planta se encontraba en plena fructificación, lo que indica que los frutos constituyen una importante demanda de nutrimentos. En general, los niveles de absorción de nutrientes para el chile dulce Polaris (Cuadro

5) fueron similares a los encontrados por Terbe et al. (2006) quienes indicaron requerimientos nutricionales con índices de 4 - 5,7 kg de K y 2,4 - 3,8 Kg de N por tonelada de frutos cosechados. No obstante, difieren con los obtenidos por Valentín et al. (2013) quienes en chile dulce reportaron índices (kg.t⁻¹) de: 7,7 de N, 0,5 de P, 7,5 de K, 1,6 de Ca y 0,6 de Mg.

Cuadro 5. Extracción de macronutrientes en el cultivo de chile dulce híbrido Polaris, Cañas, Guanacaste, 2021.

Concepto	N	P	K	Ca	Mg	S
Extracción total Kg.ha ⁻¹	90	8	140	33	12	18
Extracción comercial (Kg.ha ⁻¹)	27	5	32	3	2	3
Índice de extracción nutrimental (kg.t ⁻¹)	2,9	0,3	4,5	1,1	0,4	0,6

CONCLUSIONES

Las etapas de reproducción y cosecha presentaron la mayor demanda de grados días (GDTA) con un 35 y 42 %, coincidiendo con el mayor desarrollo de biomasa seca y de extracción de N, P, K, Ca, Mg y S, lo que indica que las flores y frutos constituyen una importante fuente de sumideros de fotoasimilados.

El cultivar de chile dulce Polaris requirió de un total de 2767 GDTA para completar el ciclo

fenológico, acumulando mayoritariamente los elementos de N, Ca, Mg y S en las hojas y el tallo, mientras que el P en los frutos.

La tendencia de absorción de los elementos muestreados en los órganos de la planta de chile dulce fue similar con los autores encontrados en la literatura, pero presentó diferencias en los GDTA, mostrando una reducción en el tiempo para alcanzar cada etapa fenológica.

LITERATURA CITADA

Alcántar, G y Trejo, T. 2006. Nutrición de cultivos. Mundi-Prensa. 462 p.

Almanza, P; Tovar, Y; Velandia, J. 2016. Comportamiento de la biomasa y de las tasas de crecimiento de dos variedades de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en Pachavita, Boyacá. Revista Ciencia y Agricultura Vol. 13 (1) pp. 67-76, Boyacá, Colombia.

Amira, M; Amal, M; Ghoname, A. 2017. Growth, yield and nutritional quality of sweet pepper plants as affected by potassium and phosphate fertilizers varying in source and solubility. *Current Science International*, vol (6): 445-457.

Ayala; M. 2012. Análisis del Crecimiento y Calidad de Semilla de Tres Tipos de Chile (*Capsicum annuum* L.). Tesis como requisito para el grado de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Texcoco, México. 41 p.

Azofeifa, A; Moreira M. 2005. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile dulce (*Capsicum annuum* CV. UCR 589) en Alajuela, Costa Rica *Agronomía Costarricense*. 29: 77-84.

Barker, A y Bryson, G. 2007 *Handbook of plant nutrition*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Barrera, J; Suárez, D; Melgarejo, L. 2010. Análisis de crecimiento en plantas. Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Vegetal. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. 25-39.

Bertsch, F. 2005. Estudios de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. Instituto de la Potasa y el fósforo. *Informaciones agronómicas* N°57.

Bertsch, F. 2003. Absorción de Nutrimentos por los Cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 307 p.

Bolaños, R; Watson, V; Tosi, J. 2005. Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge), Escala 1:750 000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.

Bugarín, M. R.; Galvis, S. A.; Sánchez, G. P. y García, P. D. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra*. 20: 391-399.

Cakmak, I. Yazici, A. 2010. Magnesium: Forgotten elements in Crop Production. *Better Crops* 94(2):23-25.

Camacho, G. 2017. Evaluación económica para la producción del híbrido de chile dulce (*Capsicum annuum*) "Dulcítico" en invernadero mediante el enfoque de presupuestos parciales, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Trabajo Final de Graduación para optar por el grado académico de Licenciatura en Economía Agrícola. Universidad de Costa Rica. p 163.

- Carrillo, K. 2016. Tesis: Efecto de la densidad de siembra y el tipo de poda de formación, sobre el rendimiento productivo y la calidad de frutos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) tipo "Bell" bajo ambiente protegido en Cañas, Guanacaste. Pp. 12-52.
- Casierra, F; Cardozo, M; Cárdenas, J. 2007. Análisis del crecimiento en frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero. *Agronomía Colombiana* 25(2): 299-305.
- Casilimas, H. Monsalve, O. Bojacá, C. Gil, R. Villagrán, E. Arias, L. Stella, L. 2012. Manual de Producción de Pimentón Bajo Invernadero. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Colombia. 32, 48-49
- Cross, R. H., McKay, S. A. B., Mchughen, A. G., and Bonham-Smith, P. C. 2003. "Heat Stress Effects on Reproduction and Seed Set in *Linum usitatissimum* L. (Flax)." *Plant Cell Envir.* 26 (7): 1013-20.
- Cruz, C; Can, Ch; Bugarín, M; Pineda, P; Flores, C; Juárez, L; Alejo, S. 2014. Concentración nutrimental foliar y crecimiento de chile serrano en función de la solución nutritiva y el sustrato. *Rev. Fitotec. Mex.* 37: 289-295.
- Easterwood, G. 2002. Calcium's role in plant nutrition. *Fluid journal*, Tampa, Florida.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2019. Production quantities of Chillies and peppers, green by country. En línea. Consultado el 15 de febrero del 2020. En: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
- Fontes P; Dias E; Graça R. 2005 Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. *Horticultura Brasileira*; 23: 275-280.
- Hunt, R. 2003. Growth analysis, individual plants. Elsevier Ltd. *Encyclopedia of applied plant sciences* 2ed, vol 1. London: Academic Press, 2003; 1618 p.
- Jiménez, F. 2017. La importancia de la nutrición con magnesio y azufre en el cultivo de la papa. *International Plant Nutrition Institute, Informaciones agronómicas de Hispanoamérica*, IAH (26):1-5.
- Maynard, D; Hochmuth G. 2007. *Knott's Handbook for Vegetable Growers*. Fifth edition. University of Florida. p 630.
- Mengel, K; Kirkby, E. A; Kosegarten, H; Appel, T. 2001. *Principles of plant nutrition*. 5th (Ed.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 635 p.
- Narayan, O; Kumar, P; Yadav, B; Dua, M; Johri, A. 2022. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*. DOI: 10.1080/15592324.2022.2030082
- Noronha, MF; Villas, BR; Grava, GL; Goto, R. 2004. Macronutrient accumulation and partitioning in fertigated sweet pepper plants. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Braz.)61(1): 62-68.
- RAMÍREZ, R. 2021. Tesis: Evaluación del efecto del ambiente generado en 4 sistemas productivos sobre el rendimiento productivo y adaptabilidad de 4 cultivos de chile dulce tipo Bell. Pp 15 – 88.
- RAMÍREZ, R; AGUILAR, J; MEZA, L. 2018. Adaptabilidad de cultivos de chile dulce bajo invernadero. *Revista Alcances Tecnológicos*. 12(1):13-23. 2018. ISSN-1659-0538. 14 p.
- Salazar, F; Juárez, P. 2013. Requerimiento Macronutricional en plantas de chile (*Capsicum annuum* L.). *Revista Bio Ciencias* 2(2): 27-34.
- Salisbury, F; Ross, C. 2000. *Fisiología de las plantas*. Thomson Editores Spain, Paraninfo S.A., Madrid.
- Segura, M. y Contreras, J. 2015. Fertilización Adaptada a las Necesidades del Cultivo: Curvas de Absorción de Nutrientes. *Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera*. 1-12 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial). 2016. Área y producción agrícola. *Boletín Estadístico* N° 27. San José, Costa Rica. MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). Consultado el 21 de enero de 2021. Disponible en <http://www.infoagro.go.cr/BEA/BEA27.pdf>
- Sonneveld C y Voogt W. 2009. *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer, Netherlands. 431 p.
- Taiz, L; Zeiger, E; Moller, I; Murphy, A. 2015. *Plant physiology and development*. 6th ed, Sinauer Associates, Incorporated.
- Taiz, L. and Zeiger E. 2010. *Plant Physiology*. Fifth Edition. Sinauer Associates Publishers, Sunderland, MA, USA. 782 p.

Terbe, I; Szabó, ZS; Kappel, N. 2006. Macronutrient accumulation in green pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by different production Technologies. International Journal of Horticultural Science 12: 13–19.

Thuy, T; Murakami, K. 2015. Effect of High Temperature on Fruit Productivity and Seed-Set of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.) in the Field Condition. Journal of agricultural science technology, vol 5.

Valentín, M; Castro, B; Rodríguez, P; Pérez, G. 2013. Extracción de macronutrientes en chile de agua (*Capsicum annuum* L.). Rev. Chapingo Ser. Hortic. 19:71-78.

White, P y Broadley, M. 2003. Calcium in plants Annals. Of Botany, 92:487 511.

Yasuor, H; Ben-Gal, A; Yermiyahu, U; Beit-Yannai, E; Cohen, S. 2013. Nitrogen Management of Greenhouse Pepper Production: Agronomic, Nutritional, and Environmental Implications. American Society for Horticultural Science, Vol 48 (10):1-9.

Yzarra, W; Trebejo, I; Noriega, V.2009. Evaluación de unidades térmicas para el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en la costa central del Perú. Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA (1):1-10.

EVALUACIÓN DEL PROTOCOLO DE MANEJO SOSTENIBLE DEL SUELO (FAO) EN TRES CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE COSTA RICA

Carlomagno Salazar Calvo¹, Carlos Mauricio Rojas Navarro²

RESUMEN

Evaluación del protocolo de manejo sostenible del suelo (FAO) en tres cuencas hidrográficas de Costa Rica. En el año 2022 se realizó una evaluación del Protocolo de Manejo Sostenible del Suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (PMSS-FAO). Del mencionado protocolo se evaluaron cuatro variables como las más importantes: Densidad Aparente (pa), contenido de Carbono Orgánico en % (COS), Productividad del Suelo y Actividad Biológica en tres diferentes cuencas hidrográficas de Costa Rica, cuenca del río Jesús María, Grande de Tárcos y Barranca. Se evaluó el PMSS en seis fincas ganaderas y diez fincas dedicadas a la producción de café. Además, de los indicadores macro mencionados, se evaluaron otros parámetros como la fertilidad disponible por medio de un análisis químico completo de suelos, la capacidad de uso de las tierras agroecológicas, análisis bromatológicos en las fincas ganaderas y en el parámetro de Actividad Biológica se evaluó la respiración microbiana ($\text{mg C-CO}_2/\text{kg de suelo.día}$), la masa microbiana (mg C/kg suelo), y como indicador adicional se midió la meso y macrofauna del suelo por medio de la técnica Biolog-Ecoplats para la Diversidad Funcional, y con ello obtener el índice de Shannon Weaver (H) para evaluar un indicador de la biodiversidad edáfica. En la primera fase del estudio, se encuestó a los productores, para identificar las prácticas de manejo sostenible de suelos y aguas (PMSSA) que tenían en sus fincas y determinar desde cuando se aplican. También, se realizó el escaneo del cumplimiento de las Directrices Voluntarias para la Gestión Sostenible de los Suelos (DVGSS) (FAO, 2017). Las cuencas estudiadas han sido degradadas por más de cien años por malas prácticas agrícolas de manejo y conservación de suelos. Cambiar la situación anterior, conlleva altos costos de inversión y la recuperación de suelos es lenta, sin embargo, los productores participantes de la investigación optaron por adoptar estas PMSSA. De la investigación se deduce que sólo dos fincas cumplieron con las DVGSS, el 80 % de las fincas de café presentaron un cumplimiento medio de las DVGSS, y las fincas ganaderas cumplen en un 50 %.

Palabras clave: Densidad aparente, productividad, actividad biológica, carbono orgánico, suelos.

1. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA-Costa Rica. csalazar@inta.go.cr.
2. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA-Costa Rica. crojasn@inta.go.cr.

ABSTRACT

Evaluation of the FAO Sustainable Soil Management Protocol in three watersheds of Costa Rica.

An evaluation of the Sustainable Soil Management Protocol of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (PMSS-FAO by its initials in Spanish) was conducted in 2022. From the mentioned protocol, four variables were evaluated as the most important: Bulk Density (pa), Organic Carbon Content in % (COS), Soil Productivity, and Biological Activity in three different watersheds of Costa Rica, Jesus Maria River, Grande de Tárcos and Barranca. The PMSS was evaluated in six cattle farms and ten coffee farms. In addition to the macro indicators mentioned above, other parameters were evaluated, such as available fertility by means of a complete chemical analysis of soils, the capacity of agro-ecological land use, bromatological analysis in livestock farms, and the Biological Activity parameter, Microbial Respiration (mg C-CO₂/kg soil.day), microbial mass (mg C/kg soil), and as an additional indicator, soil mesofauna and macrofauna were measured Biolog-Ecoplats technique for Functional Diversity, to obtain the Shannon Weaver index (H) to evaluate an indicator of soil biodiversity. In the first phase of the study, producers were surveyed to identify the sustainable soil and water management practices (PMSSA by its initials in Spanish) they had on their farms and to determine how long they had been applied it. Also, a scan of compliance with the Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management (FAO 2017). The studied watersheds for over one hundred years due to poor agricultural practices in soil management and conservation. Changing the previous situation involves high investment costs, and soil recovery is slow, however, the producers participating in the research chose to adopt these PMSSA. From the research it is deduced that only two farms complied with the DVGSS, 80 % of the coffee farms showed medium compliance with the DVGSS, and de livestock farms comply with 50 %.

Keywords: Bulk density, productivity, biological activity, organic carbon, soils.

INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra exhibe en la actualidad una serie de problemas globales que ejercen presión sobre los recursos naturales que son la base de nuestro diario interactuar. Así, la expansión urbana, el cambio climático, la pobreza, la inseguridad alimentaria, la sequía, la pérdida de biodiversidad, la degradación de las tierras, la contaminación, la migración de las poblaciones y las pandemias, son ejemplos de esta problemática que hay que solucionar, si se desea el desarrollo sostenible de las poblaciones humanas.

En este contexto, es muy importante valorar el papel de los suelos en los servicios ecosistémicos que proveen y que permiten la resiliencia de la vida en la Tierra.

La importancia del Manejo Sostenible de los Suelos (MSS) para la FAO, recae en garantizar que los suelos se manejen de manera sostenible y que los suelos degradados se rehabiliten o se restauren.

Con base en lo anterior, nace el Protocolo de Manejo Sostenible del Suelo (PMSS), para identificar si las prácticas de manejo utilizadas por los productores están en concordancia con la gestión sostenible del suelo, lo cual, se definió por medio del Convenio de las Directrices Voluntarias de la Gestión Sostenible del Suelo (DVGSS) (FAO-ITPS, 2015).

Este protocolo proporciona indicadores clave y un conjunto de herramientas para evaluar las funciones del suelo versus sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Además, el protocolo pretende una evaluación de la capacidad de un suelo para mantener servicios ecosistémico priorizados y así, mejorar la calidad de vida de los productores, la productividad y la rentabilidad de manera sostenible. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue Validar el Protocolo de Manejo Sostenible del Suelo en tres cuencas de Costa Rica: río Jesús María, río Grande de Tárcos y río Barranca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde al Pacífico Central de Costa Rica, específicamente el estudio se localizó en tres diferentes cuencas hidrográficas de Costa Rica: río Jesús María (7 fincas), río Barranca (1 finca), río Grande de Tárcoles (8 fincas), que a su vez pertenecen a cuatro cantones de la provincia de Alajuela: San Ramón, Palmares, San Mateo y Atenas. El proyecto tiene influencia indirecta en 270,2 ha que componen el área total

de las 16 fincas evaluadas y directamente sobre 16 ha de las mismas fincas, ya que se evaluó una ha de cada finca por productor participante, no obstante, las 16 fincas evaluadas eran manejadas de manera agroconservacionista en su totalidad.

El área se enmarca dentro de las coordenadas métricas 1.050.000-1.120.000 y 430.000-455.000 de la proyección CRTM-05 (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de las fincas y puntos de muestreo de las 16 fincas evaluadas en las cuencas del río Jesús María, Barranca y Grande de Tárcoles, setiembre de 2023.

Primera fase

Por medio de una encuesta realizada a los productores, y con base en el Protocolo de Manejo Sostenible de Suelos y Aguas (PMSSA) se caracterizaron cada una de las 16 fincas pilotos (6 de ganadería y 10 de café) y de esta manera validar dicho protocolo (FAO-ITPS, 2020). La encuesta contemplaba diferentes parámetros, dentro de los que se destacaban, el área, uso de la tierra, capacidad de uso de las mismas, y la ubicación geográfica y política de cada predio. En cada

finca, se realizó un cateo de suelos, que consiste en una observación simple con barreno Edelman (tipo holandés) para determinar la Capacidad de Uso de las Tierras (Decreto Ejecutivo No. 41960 MAG-MINAE, 2019). Así, la encuesta permitió evaluar el cumplimiento de las Directrices Voluntarias para la Gestión Sostenible de los Suelos en cada finca de la investigación (DVGSS) (FAO, 2017).

Indicadores medidos

Los indicadores medidos en cada una de las fincas pilotos fueron los recomendados por el Protocolo de Evaluación del Manejo Sostenible de Suelos (FAO-ITPS, 2020) como obligatorios: Productividad del suelo, Porcentaje de Carbono Orgánico, Densidad Aparente y Actividad Biológica del suelo. Como indicador adicional se midió la meso y macrofauna del suelo por medio de la técnica Biolog-Ecoplatos para la Diversidad Funcional, y de esta manera evaluar un indicador de la biodiversidad edáfica. Todos los indicadores evaluados se realizaron en la época lluviosa de Costa Rica, en el mes de agosto.

Muestreo

El diseño de muestreo en las áreas homogéneas, más representativas del relieve de las fincas, se realizó por medio de una muestra compuesta, recolectada en cinco puntos de muestreo con dos repeticiones por punto y separadas unas de otras por 10 m (Figura 2).

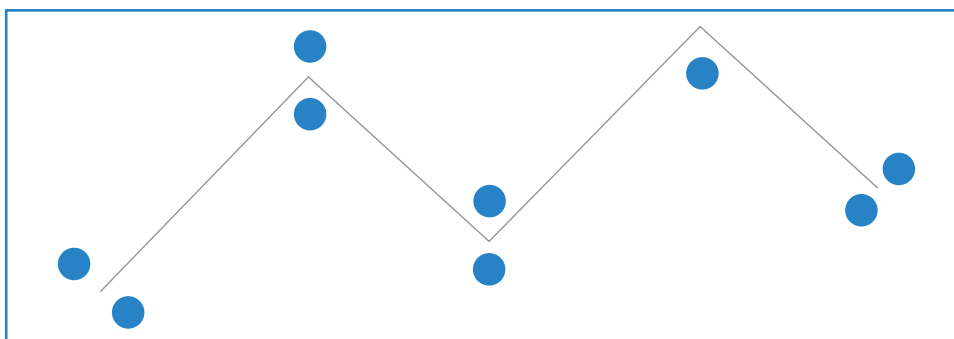


Figura 2. Esquema de los puntos de muestreo, espaciados 10 m, con dos repeticiones, para un total de 10 submuestras. INTA. Agosto, 2022.

Cada unidad de muestreo contempla una superficie de una ha. Se tomó una muestra compuesta por área homogénea. Para la Densidad Aparente se tomó una muestra por finca, debido a la falta de presupuesto para ampliar el número de muestras.

La productividad del suelo en fincas de café, se realizó por medio de la producción de café en cereza y como unidad de medida la cantidad de fanegas/ha. Una fanega de café en fresco es igual a 258 kg aproximadamente, lo que sería alrededor de 46 kg de café oro (ya procesado y seco).

Para las fincas ganaderas, la productividad del suelo, se midió bajo la técnica del Botanal® (Franco, 2005) para determinar producción

de biomasa, además se tomó una muestra compuesta de pasto, según la variedad encontrada en cada finca, la cual se transportó en bolsas de papel selladas y previamente identificadas con la variedad de pasto, edad fenológica y la identificación de la finca. La muestra se toma, de tal manera que se asemeje al comportamiento del animal cuando ingiere la planta. Con las muestras de pasturas se realizaron los análisis bromatológicos tanto de la fracción proximal (proteína cruda, materia seca) como la fracción Van Soest (fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y digestibilidad in vitro de la materia seca), dichos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de piensos y forrajes del INTA, para determinar la calidad nutricional de los pastos evaluados.

Segunda fase

La metodología para la segunda fase del proyecto abarcó los siguientes pasos:

Paso 1: una vez que se estaba en la finca a muestrear, con ayuda de un recipiente (balde) y un barreno Edelman, se tomaron las submuestras de suelo a 20 cm de profundidad y se depositaron en el balde, teniendo cuidado en todo momento de no tocar las submuestras con la mano, para no contaminar las mismas con exudados producto del sudor del técnico. En la hectárea seleccionada de la finca y debidamente georeferenciada, se tomó un mínimo entre 14 a 15 submuestras, en forma de zigzag, evitando trillos, excrementos de animales, realizarla debajo de una cerca, o donde se haya quemado, luego se realizó un cuarteo sobre un cartón limpio (Figura 3), y se seleccionaron dos muestras de suelo de aproximadamente un kg de peso, una dirigida al laboratorio de suelos del INTA, para el análisis químico completo + carbono orgánico y la otra dirigida bajo refrigeración al laboratorio de Microbiología del CIA-UCR para los análisis de actividad biológica.

El análisis químico completo se realizó mediante la solución extractora Olsen Modificado, (NaHCO_3 0.5 N, EDTA 0.01 N y el flocculante "Superfloc" ajustado a pH 8,5 con NaOH) fertilidad disponible: P-K-Fe-Cu-Zn-Mn, Ca-Mg-Al: solución extractora de KCl 1 N y relación suelo-solución 1:10. La acidez intercambiable bajo el método Peech et al. (1947) con Cloruro de potasio 1N. El pH en H_2O : potenciométricamente, en relación suelo: agua 1:2,5. La Materia Orgánica bajo el método de Walkley y Black (1938) que consiste en combustión húmeda con dicromato de potasio, al dato total de carbono reportado se le aplica el 58 % y se obtiene el Carbono Orgánico. Con lo anterior, se cumple con un Indicador Macro del Protocolo Manejo Sostenible del Suelo, que es el contenido de Carbono Orgánico en porcentaje.



Figura 3. Ilustración del cuarteo de la muestra de suelos. INTA. Agosto, 2022.

Paso 2: en cuanto al indicador macro de Actividad Biológica, se midieron tres parámetros: Respiración, Masa Microbiana y Diversidad Funcional, seguidamente se explican los pasos para determinar cada uno de ellos.

La Respiración Microbiana del suelo, se determinó de acuerdo con la metodología de Anderson (1982), se pesó en beakers 10 g de suelo por triplicado, la muestra se colocó en una jarra de incubación junto con un recipiente que contenía 10 ml de agua y otro con 10 ml de NaOH (1M) y se

incubaron a 25° C. A los cuatro días se determinó la cantidad de CO_2 absorbido en el NaOH, para lo cual se adicionó 10 ml de BaCl. Se transfirió esta mezcla a un erlenmeyer y se adicionó tres gotas de fenolftaleína, se tituló la solución con HCl (0,5M). Se determinó el CO_2 generado en los tres días de incubación.

La Biomasa Microbiana se determinó por medio de la metodología de fumigación extracción (Vance et al. 1987), para lo cual se pesaron 10 g de muestra (control) en un erlenmeyer de 250 ml, se



adicionó 50 ml de K_2SO_4 (0,5M), se agitó 30 min. y se filtró con un papel Whatman 42. Se guardó el extracto a 4 °C hasta su procesamiento. También, se pesó 10 g de muestra (fumigado) en un beaker de 40 ml, se fumigó con cloroformo libre de etanol, se incubó durante 24 h a 25 °C. Se procedió igual que la muestra control. Del extracto obtenido se colocó ocho ml en tubos de digestión (tres repeticiones control y tres fumigado), se adicionó dos ml de $K_2Cr_2O_7$ (66,7 mM), 70 mg de HgO y 15 ml de mezcla ácida (2v H_2SO_4 (98 %) y 1v H_3PO_4 (88 %)). Las muestras se digirieron a 150 °C por 30 minutos y se dejaron enfriar. Se transfirieron a un erlenmeyer de 250 ml, se adicionó 80 ml de agua destilada, se agregó tres gotas de fenantrolina y se valoró el exceso de $K_2Cr_2O_7$ con sal de Mohr 33,3 mM $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2 \cdot 6(H_2O)$.

Para determinar la Diversidad Funcional, se recurrió a la capacidad de las comunidades microbianas del suelo para utilizar una variedad de fuentes de carbono, se midió con Biolog Eco-Plates (Biolog Inc., EE.UU.). El sistema Biolog Eco-Plates constaba de 31 fuentes de carbono más un pozo control que contiene agua. Las fuentes de carbono se subdividieron en seis grupos de sustratos, incluidos carbohidratos, ácidos carboxílicos, aminoácidos, polímeros, ácidos fenólicos y aminas. Los microorganismos del suelo se extrajeron de acuerdo con el procedimiento seguido por Luan et al. (2020). En primer lugar, se añadieron 5 g de suelo (equivalente en peso seco) a 45 ml de solución salina estéril al 0,85 % (peso/vol). A continuación, la mezcla se agitó durante 30 min a 90 rpm en un agitador orbital y se dejó reposar durante 2 h. Posteriormente,

1 ml del sobrenadante se diluyó a 20 ml con solución salina esterilizada. Cada pocillo de Biolog EcoPlates se inoculó con 200 μ l de la suspensión mixta, después de lo cual las placas se incubaron a 25 °C en la oscuridad durante siete días. La tasa de utilización de las fuentes de carbono se determinó mediante la reducción del tinte redox violeta de tetrazolio, que cambia de incoloro a púrpura si los microorganismos agregados utilizan el sustrato. El desarrollo de color de pozo promedio (AWCD), que indica la utilización de carbono, se calculó tomando medidas de absorbancia a 590 nm cada 24 h. Para el análisis posterior se utilizó la absorbancia en un único punto de tiempo (96 h), cuando se alcanzó la asíntota. Las mediciones de la densidad óptica a 590 nm (OD590) de cada pocillo se corrigieron restando los valores de control (pocillo en blanco) de los valores que representan cada pocillo de la placa.

Paso 3: Para el indicador macro de Densidad Aparente, se tomó una única muestra representativa de la hectárea seleccionada. Esta se realizó bajo el método del cilindro, con la metodología descrita por Forsythe (1980). Se introduce un cilindro de aluminio de cinco cm de alto por cinco cm de diámetro en el suelo, con ayuda de un muestreador de suelos y un mazo de hule para no compactar la muestra, se saca el cilindro lleno de suelo con la ayuda de un palín o puñal, y con ayuda de una cegueta se elimina la rebaba que sobra del cilindro por ambas partes de este, tratando en todo momento de que la muestra sea indisturbada y no compactada. El cilindro se coloca en la parte superior del suelo (generalmente horizonte Ap) en forma vertical (Figura 4).



Figura 4. Ilustración de la extracción de la densidad aparente del suelo, con el método del cilindro para muestra indisturbada, se puede observar el muestreador y mazo de hule para no compactar. INTA. Agosto, 2022.

Paso 4: para evaluar el indicador macro de productividad del suelo se utilizó en las fincas de café, pasar una encuesta a los productores para preguntarles la productividad de la cosecha de café 2021, puesto que la cosecha del año 2022 todavía no estaba disponible. En Costa Rica, la producción de café se mide en fanegas/ha, una fanega es igual a 46 kilogramos de grano oro aproximadamente, por tanto, en la base de datos se anotó la producción en toneladas métricas por hectárea. En cuanto a las seis fincas de ganadería la producción se evaluó en toneladas de masa seca/ha, aplicando la técnica del Botanal® (Franco, 2005) (Figura 5), para determinar producción de biomasa, además se tomó una muestra compuesta de pasto la cual se transportó en

bolsas de papel selladas y previamente identificadas con la variedad de pasto, edad fenológica y la identificación de la finca, la muestra se toma, de tal manera que se asemeje al comportamiento del animal cuando ingiere la planta, utilizando una tijera podadora y dejando el pasto a la altura que normalmente la dejan los semovientes; con las muestras de pasturas se realizarán los análisis bromatológicos tanto de la fracción proximal (proteína cruda, materia seca) como la fracción Van Soest (fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y digestibilidad in vitro de la materia seca), lo cual se determinó en el laboratorio de piensos y forrajes del INTA para determinar la calidad nutricional de los pastos evaluados.



Figura 5. Aplicación de la técnica del botanal® a las diferentes pasturas, según las variedades encontradas en cada finca. INTA. Agosto, 2022.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El 67 % de las fincas ganaderas presentaron una fertilidad química disponible muy baja y el 33 % una fertilidad química disponible baja, según los parámetros del Decreto Ejecutivo No. 41960-MAG-MINAE. Por su parte, el 80 % de las fincas de café presentaron una fertilidad muy baja,

un 10 % presentaron fertilidad baja y un 10 % fertilidad media (Cuadro 1). Esta última finca, clasificó preliminarmente, con criterio de experto dentro del Orden de los Alfisoles, mientras que las 15 fincas restantes dentro del Orden de los Ultisoles.

Cuadro 1. Datos de fertilidad química disponible en las 16 fincas evaluadas con el Protocolo Manejo Sostenible del Suelo (PMSS)

		Cmol (+)/l					mg/l					% Sat. Acidez	% Sat. Bases	% MO	% CO	CICE Cmol (+)/l	Categorización de Fertilidad Química
ID Finca	pH H2O	Ca	Mg	K	Acidez	Suma de Bases	P	Fe	Cu	Zn	Mn						
F1	5,5	0,9	0,5	0,14	1,6	1,54	7	121	7	1,8	19	50,9	49,04	10,10	5,86	3,14	Muy Baja
F2	5,3	0,7	0,5	0,16	1,6	1,36	5	117	3	3,3	11	54,4	45,95	12,91	7,49	2,96	Muy Baja
F3	4,7	2	0,5	0,74	3,4	3,24	12	247	13	3,4	60	51,2	48,80	0,97	0,56	6,64	Muy Baja
F4	4,6	1,6	0,5	0,91	3,4	3,01	22	419	16	2,5	47	52,9	46,96	8,84	5,13	6,41	Muy Baja
F5	4,6	1,8	0,5	0,46	4	2,76	11	408	12	1,4	33	58,8	40,83	6,34	3,68	6,76	Muy Baja
F6	5,2	20,4	7,1	1,4	1,7	28,9	9	14	4	1,4	37	5,6	94,44	1,71	0,99	30,6	Muy Baja
F7	4,9	6,2	1,2	1,03	5,7	8,43	11	212	9	2,2	69	40,1	59,66	2,76	1,6	14,13	Muy Baja
F8	5,7	14,7	4,6	2,4	0,2	21,7	27	120	20	9,7	47	1,1	99,09	4,93	2,86	21,9	Media
F9	5,2	4,6	0,5	0,87	0,8	5,97	14	198	27	3	33	11,8	88,18	6,84	3,97	6,77	Baja
F10	4,8	8,4	2,7	0,94	4,7	12,04	31	351	15	5,4	69	28	71,92	4,15	2,41	16,74	Muy Baja
F11	5,3	11	2,7	0,94	1,3	14,64	8	155	16	2	76	8,1	91,84	5,14	2,98	15,94	Muy Baja
F12	4,9	3	0,8	0,71	4,6	4,51	13	150	11	3,7	48	50,8	49,51	4,00	2,32	9,11	Muy Baja
F13	5,4	5,8	1,4	0,46	0,4	7,66	25	204	26	5,6	80	4,7	95,04	5,33	3,09	8,06	Baja
F14	5,3	4,3	1,3	0,21	0,7	5,81	7	196	19	2,6	52	10,5	89,25	5,38	3,12	6,51	Baja
F15	5,2	11,4	5,9	0,39	4,6	17,69	4	83	14	2,5	126	20,6	79,36	2,95	1,71	22,29	Muy Baja
F16	5,5	12,1	4,3	0,62	0,4	17,02	4	102	18	2,4	46	2,4	97,70	4,67	2,71	17,42	Muy Baja

De las fincas dedicadas a la producción de café, un 30 % presentan valores bajos de Carbono Orgánico en el suelo (COS <1,15 %) (Fassbender, 1993), las fincas F3, F6 y F12; un 10 % valores medios (COS 1,20-2,3 %), finca F7; y un 60 % valores altos (2,40-5,80 %), fincas F4-F5-F8-F10 y F11. Las fincas que presentan valores bajos de CO tienen 2 años de ser laboradas bajo técnicas de agricultura conservacionista y sostenible, las de valores medios oscilan entre un año y cuatro años, y las de valores altos tienen dos años de haber adoptado técnicas agroconservacionistas, porque es café renovado (nuevo), sin embargo, la finca 11 a pesar que renovó el café hace dos años,

tiene 20 años de ser laborada bajo un enfoque agroconservacionista (Cuadro 1).

En cuanto a las fincas de ganadería, la mitad de éstas presentan valores altos de CO (50 %, Fincas 13-14 y 16) (Fassbender, 1993), dos fincas presentan valores muy altos (33,34 %, Fincas 1 y 2), en donde ambas fincas tienen diez años de trabajar bajo prácticas agroconservacionistas del suelo. Finalmente, una finca presenta un valor medio (16,66 %, Finca F15, Fassbender, 1993), es decir en total las fincas ganaderas tienen valores de carbono orgánico del suelo, entre medio a muy alto (Cuadro 1).

En Costa Rica, Alvarado y Forsythe (2005) encontraron valores de densidad aparente para los Órdenes Ultisoles y Alfisoles que variaban entre 0,53 a 1,83 Mg.m^{-3} y de 0,96 a 1,42 Mg.m^{-3} cuando se comparaban los promedios. Por tanto, en esta investigación todos los valores encontrados se encuentran dentro de esos rangos (Figura 6); por lo cual se pueden considerar como valores normales, sin evidencia de compactación, ya que cuando pasan de 1,80 Mg.m^{-3} pueden tener problemas de compactación (Henríquez & Cabalceta, 1999).

El rango de densidad aparente para las fincas de café fue de 0,73- 1,42 Mg.m^{-3} y de 0,86-1,17 Mg.m^{-3} para las fincas de ganadería. Así como una media de 1 Mg.m^{-3} para las fincas de café y de 1,04 Mg.m^{-3} para las fincas de ganadería. Además, un 44 % de la totalidad de las fincas (café y ganadería) presentaron densidades aparentes menores a 1,00 Mg.m^{-3} . Lo que evidencia que las 16 fincas bajo prácticas agroconservacionistas del suelo no tienen problemas de compactación, al menos por el método de la densidad aparente.

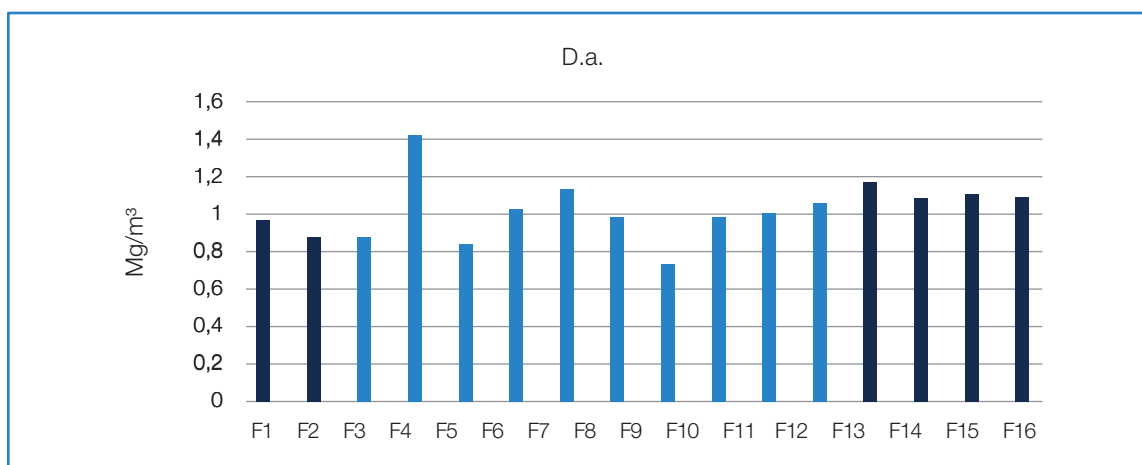


Figura 6. Datos de la densidad aparente en las 16 fincas evaluadas. En azul las fincas ganaderas y en celeste las fincas cafetaleras. INTA. Agosto, 2022.

Las fincas cafetaleras F4 y F5, alcanzan valores muy altos de respiración microbiana (valores $>286 \text{ Mg CO}_2\text{-C/kg de suelo/día}$), y el resto de las fincas tanto de café como de ganadería presentan valores altos ($>143 \text{ Mg CO}_2\text{-C/kg de suelo/día}$), (F1, F2, F6, F7, F8, F9, F10, F12), valores medios ($>71 \text{ Mg CO}_2\text{-C/kg de suelo/día}$) (F11 y F14), valores bajos ($<71 \text{ Mg CO}_2\text{-C/kg de suelo/día}$) (F13 y F16) y muy bajos ($<43 \text{ Mg CO}_2\text{-C/kg de suelo/día}$) (F15) (USDA-NRCS, 2014) (Figura 7).

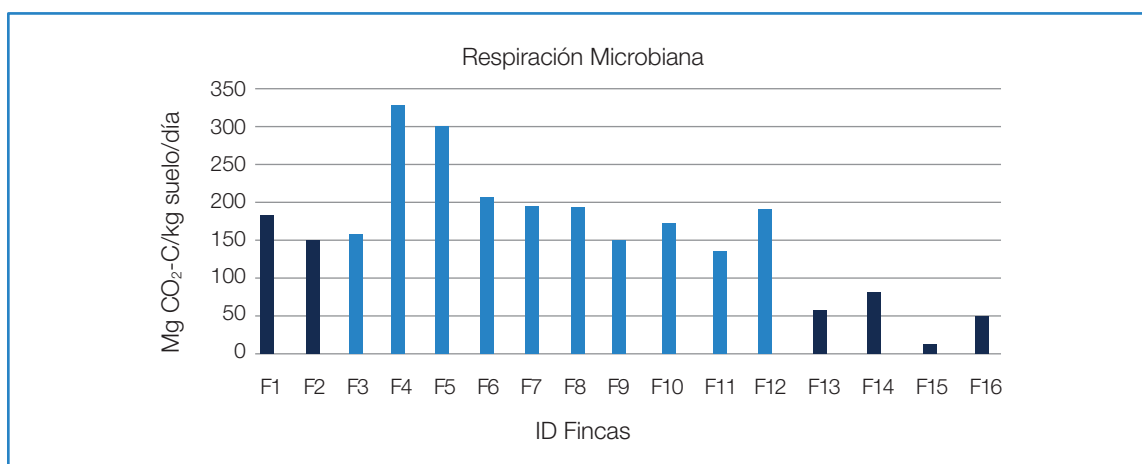


Figura 7. Datos de respiración microbiana en $\text{Mg CO}_2\text{-C/kg de suelo/día}$. Las fincas en color azul son las fincas dedicadas a la ganadería y las fincas en celeste son las dedicadas a la producción de café. INTA. Agosto, 2022.

Por su parte la Biomasa Microbiana se presentó en un rango entre 86-235 Mg C/kg de suelo en las fincas de café y de 136-340 Mg C/kg de suelo en las fincas de ganadería (Figura 8). La finca de ganadería F1 presentó el valor más alto de masa microbiana y la F8 los contenidos más bajos en las condiciones en que se evaluó el ensayo, en cuanto a época del año, y humedad en el suelo (Figura 8).

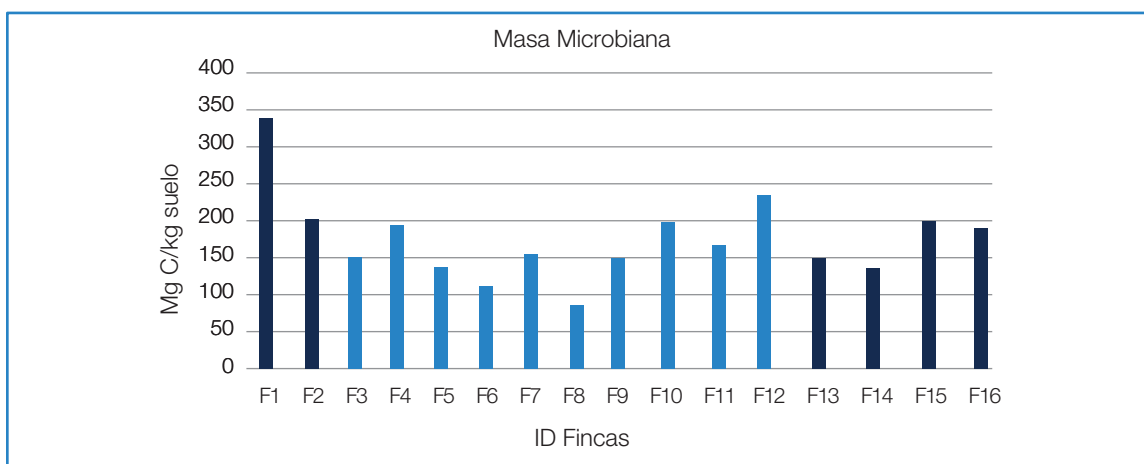


Figura 8. Datos de masa microbiana en Mg C/kg de suelo en las 16 fincas evaluadas con el protocolo MSS. Con relleno azul las fincas ganaderas y en celeste las fincas cafetaleras. INTA. Agosto, 2022.

Como indicador adicional a la actividad biológica se evaluó la meso y macrofauna del suelo por medio de la técnica Biolog-Ecoplatos para la Diversidad Funcional, y de esta manera evaluar un indicador de la biodiversidad edáfica. En este caso se midió bajo el índice de Shannon-Weaver, en donde $H < 2$, significa un índice de diversidad funcional bajo, un $H = 2-3$, sería un índice de diversidad funcional normal y un $H > 3$ indica un índice de diversidad funcional alto.

De las fincas de café y ganadería, ninguna finca presentó un índice de diversidad funcional bajo. Las fincas de ganadería F3 y F12 presentaron un índice de diversidad funcional normal, al igual que la finca F2 de ganadería. El resto de fincas presentaron un índice de diversidad funcional alto (Figura 9).

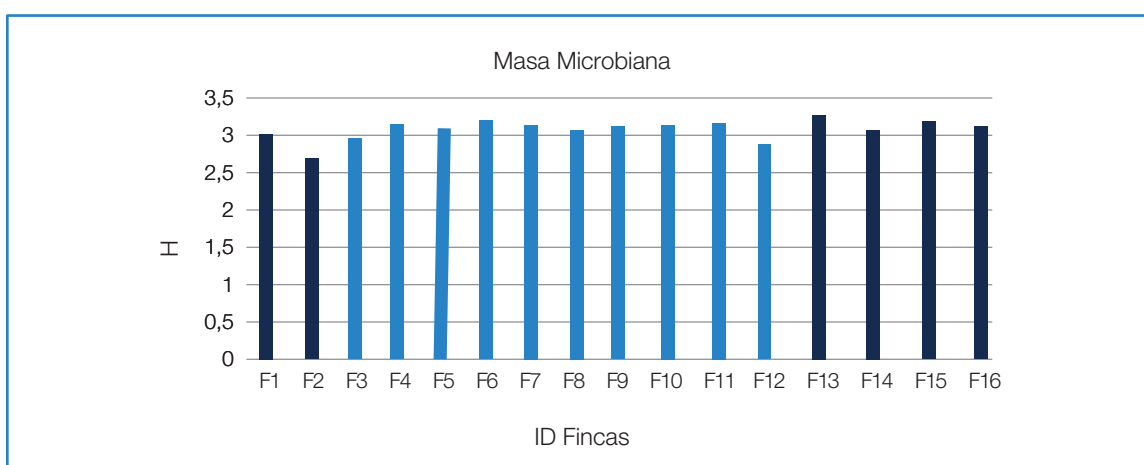


Figura 9. Datos de los índices de Shannon Weaver (H), un $H < 2$ se refiere a una diversidad funcional baja, un H entre 2-3, se refiere a una diversidad funcional normal y un $H > 3$ presenta una diversidad funcional alta. En color azul las fincas ganaderas y en celeste las fincas cafetaleras. INTA. Agosto, 2022.

En cuanto al índice de Productividad del Suelo, el promedio de producción de café de las diez fincas evaluadas es de 0,53 ton/ha, equivalente a aproximadamente 11,52 fanegas/ha en las cuencas evaluadas. Hay que tomar en cuenta que en Costa Rica el promedio de producción/ha a decaído un 30 % en los últimos 20 años, pasando de 28 fanegas/ha a 20 fanegas/ha (FAO 2021).

El rango de producción en los cafetales estuvo entre 0,045 ton/ha-0,85 ton/ha, es decir, de aproximadamente 0,97 fanegas/ha-18,48 fanegas/ha. Es decir, que la producción más alta de las fincas analizadas está cerca del promedio en Costa Rica, con tan sólo dos años de establecido.

De las seis fincas ganaderas evaluadas en la zona, cinco tenían un sistema de pastoreo y solamente una tenía pasto de corte.

La finca número 13 (F13), es la única de las fincas evaluadas que contaba con un sistema de pasto de corte, en dicha finca se encontró Pasto Cuba OM 22 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*).

De acuerdo con lo citado por Arronis (2022) (Cuadro 2) sobre la calidad nutricional y la producción de biomasa para el Pasto Cuba 22 OM a una edad de corte de 60 días, el pasto de la finca 13 se encuentra por debajo en producción de materia seca a esa edad, según lo reportado en la literatura, esto se puede deber a la densidad de siembra de este en la respectiva finca.

La finca F15, dentro de la validación del PMSS-FAO, presento la particularidad de que no había introducido una variedad de pasto mejorado, lo que se encontró fue una mezcla de Jengibrillo (*Paspalum notatum*) y *Brachiaria spp*,

esta situación dificulta hacer comparaciones con valores reportados en la literatura, pero esta mezcla tiene un buen perfil nutricional, aunque la producción de biomasa es bastante baja, esto se debe a que no se le está dando el suficiente tiempo de recuperación a la pastura, además que de las fincas evaluadas presentaba la mayor erosión, lo que puede ser una causa en la producción de biomasa.

Las fincas F1 y F16 contaban con *Brachiaria brizantha* de 30 a 40 días de edad. El perfil nutricional de la *Brachiaria brizantha* encontrada en la finca 1 y en la finca 16 evaluadas en el PMSS-FAO, estaban en el ámbito de lo expuesto por Martínez (2018) y Villalobos (2020) (cuadro 2 y 7), para este pasto en Costa Rica, con la excepción de la digestibilidad de la materia seca de la finca 1, donde este valor está por debajo de lo reportado por la literatura, esta variación se pudo dar debido a que la edad de la *Brachiaria brizantha* en la finca 1 era de 40 días mientras que en la finca 16 era de 30 días. Los valores de biomasa están muy similares entre ambas fincas, la diferencia se pudo dar porque en la finca 16 el potrero contaba con más árboles y tenía mayor pendiente, lo cual, pudo haber afectado la producción de biomasa por exceso de sombra y por una mayor erosión hídrica del suelo debido a una pendiente más pronunciada.

Las fincas F2 y F14 presentan Pasto Guinea variedad Mombaza (*Megathyrus maximus*) con una edad menor a 20 días de siembra. El contenido nutricional del pasto Mombaza en las fincas F2 y F14, está en el ámbito de lo citado por Martínez (2018) (Cuadro 2). El valor de digestibilidad encontrado en la finca 13 difiere debido a que la pastura tenía 13 días de siembra. La producción de biomasa también está asociada a la edad de la pastura, menor a 20 días de siembra.

Cuadro 2. Resumen de datos de análisis de laboratorio de las fincas ganaderas en la Segunda Fase del Proyecto, setiembre 2022

ID Fincas	Biomasa Ton/h/ms	% MS	% FDN	% FDA	% Lignina	% PC	% cenizas	DIVMS	Fuente
F1	8,1	21,79	76,40	36,32	3,02	8,89	9,79	55,09	PMSS-FAO F1
F2	3,3	26,40	79,15	44,71	2,41	10,90	10,31	51,14	PMSS-FAO F2
F13	4,80	10,50	63,99	32,16	5,99	8,61	15,28	92,33	PMSS-FAO F13
F14	1,0	18,92	64,63	28,82	3,16	12,51	10,16	93,45	PMSS-FAO F14
F15	2,7	26,91	73,93	39,24	2,29	8,96	15,76	58,05	PMSS-FAO F15
F16	7,4	20,45	72,22	40,76	3,31	6,44	11,52	81,08	PMSS-FAO F16
Referencia	-	25,63	69,46	35,06	2,03	8,17	9,97	72,55	Martínez, 2018
Referencia	-	-	68,00	-	-	8,20	-	66,65	Villalobos, 2020
Referencia	40,2	17,76	67,80	38,67	2,53	9,76	11,50	-	Arronis 2022

Todas las fincas seleccionadas para este estudio, estaban aplicando PMSSA en menor o mayor grado, la evaluación preliminar sobre el cumplimiento de las DVGSS (Cuadro 3), indica que en ninguna finca hay un cumplimiento alto de las DVGSS. En 10 fincas (62,5 %) hay un cumplimiento medio, en dos hay un cumplimiento bajo (12,5 %) y en 4 fincas (25 %) no se cumplen las DVGSS. En este último caso, en tres de las seis fincas ganaderas, no hay cumplimiento de las DVGSS. Las causas principales de la falta de cumplimiento de las DVGSS son la reducción de los rendimientos, problemas de erosión asociados comúnmente a ganadería intensiva en altas pendientes que causan pérdidas de nutrientes y materia orgánica.

A continuación, se muestran (Cuadro 3) algunos valores de caracterización de las fincas estudiadas, así como los años de implementación de prácticas de conservación de suelos y aguas y los resultados del escaneo del PMSS-FAO, con su grado de cumplimiento de las DVGSS: Alto (AC), Medio (MC), Bajo (BC) y No Cumplimiento (NC). En la última columna se pondera los resultados de los indicadores y se anota el Cumplimiento de las DVGSS de forma global para cada una de las fincas. Lo anterior, para visualizar mejor los resultados de los indicadores y fincas sobre el fondo, de acuerdo con el cumplimiento de las DVGSS: NC: rojo; BC: naranja, MC: amarillo y AC: verde (Cuadro 4).

Cuadro 3. Presentación de algunos datos de caracterización de las 16 fincas evaluadas, años de implementación de prácticas de MSS y escaneo del PMSS-FAO

ID	Nombre del Productor(a)	Coordenadas (grados decimales)	Altitud m s. n. m.	Lugar	Actividad	Capacidad de Uso de las Tierras	Años de implementación de Prácticas Agroconservacionistas	Escaneo del PMSS	Cumplimiento
F1	Miguel Alpizar Delgado	Latitud: 9,04497 Longitud: -84,50576	261	Desamaparados-San Mateo	Ganadería	III e12s1234c2 Uso Conforme	10	2,5	Bajo
F2	René Salazar Blanco	Latitud: 9,95189 Longitud: -84,50626	315	Desamaparados-San Mateo	Ganadería	V e12s1234d1c12 Uso Conforme	10	2,5	Medio
F3	Willman Alvarado Castillo	Latitud: 10,03029 Longitud: -84,45331	1.153	Rincón de Zaragoza-Palmares	Café	VI e12s24d1c23 Uso Conforme	5	4	No
F4	Joaquín Rojas Vargas	Latitud: 10,03063 Longitud: -84,45088	1.076	Quebradas, Santiago-Palmares	Café	VII e12s124d1c23 Uso Conforme	5	5	Medio
F5	Arnoldo Herrera Pérez	Latitud: 10,02667 Longitud: -84,45556	1.1068	Quebradas, Santiago-Palmares	Café	VII e12s24d1c123 Uso Conforme	5	4	Medio
F6	Walter Chavarria Vargas	Latitud: 10,01304 Longitud: -84,47557	1.262	Berlín-San Ramón	Café	VII e12s1234d1c123 Uso Conforme	5	4,5	Medio
F7	Felipe Chavarria Vargas	Latitud: 10,02271 Longitud: -84,47608	1.311	Berlín-San Ramón	Café	VI e12s24d1c123 Uso Conforme	20	5,5	Medio
F8	Luisa y Rosa Rodríguez Solórzano	Latitud: 10,07550 Longitud: -84,44354	1.067	Buenos Aires-Palmares	Café	III e12s24c23 Uso Conforme	20	3	Medio
F9	Ronald Vásquez Rodríguez	Latitud: 10,04529 Longitud: -84,43253	1.028	Zaragoza-Palmares	Café	III e12s124d1c2 Uso Conforme	20	3	Medio
F10	Luis Ángel Chinchilla Mora	Latitud: 10,02668 Longitud: -84,46102	1.242	Zaragoza-Palmares	Café	VII e12s124d1c123 Uso Conforme	20	5	Bajo
F11	Walter Carranza Rojas	Latitud: 10,00769 Longitud: -84,44898	1.208	San Isidro-Atenas	Café	VII e12s124d1c123 Uso Conforme	20	6	Medio
F12	Manuel Antonio Rojas Pacheco	Latitud: 10,00972 Longitud: -84,45012	1.277	Santiago-Palmares	Café	VII e12s124d1c123 Uso Conforme	20	2	Medio
F13	Walter Vargas González	Latitud: 9,94826 Longitud: -84,55686	226	Higuito-San Mateo	Ganadería	V e2s124d1c2 Uso Conforme	20	1	No
F14	Patricia Soto Quesada	Latitud: 9,95580 Longitud: -84,59664	232	Jesús María-San Mateo	Ganadería	IV e12s234c2 Uso Conforme	20	3,5	Medio
F15	Benigno Miranda Molina	Latitud: 9,96336 Longitud: -84,46858	640	Desmonte-San Mateo	Ganadería	VII e12s1234d1c23 Divergencia de Uso	20	5	No
F16	Reyes Campos Miranda	Latitud: 9,95040 Longitud: -84,47638	678	Desmonte-San Mateo	Ganadería	VI e12s1234d1c23 Divergencia de Uso	30	6	No

Cuadro 4. Evaluación del cumplimiento del Manejo Sostenible del Suelo con las DVGSS según la tendencia que muestran los cuatro indicadores recomendados.

Cumplimiento	Tendencia
No	Uno o más indicadores muestran una tendencia al empeoramiento.
Bajo	Todos los indicadores mantienen los mismos valores.
Medio	Ningún indicador empeora y uno o dos indicadores mejoran.
Alto	Ningún indicador empeora y más de dos indicadores mejoran.

* Se considera que los indicadores mejoran o empeoran cuando la diferencia es de 5 % o más.

Las tierras de las cuencas: río Jesús María, río Grande de Tárcoles y río Barranca han sido degradadas por más de 100 años. En su mayoría estas fincas se han dedicado al cultivo de café y a la ganadería, y su degradación corresponde a malas prácticas agrícolas de manejo y conservación de suelos. Por ende, luego de haber cambiado y convencido a los productores de su manera

de laborar estas fincas, ellos han cambiado su manejo, a prácticas de manejo sostenible de los suelos, lo anterior, es una decisión difícil de llevar a cabo, primero por los costos en inversión de prácticas sin retorno económico y lo otro es lo lento de la recuperación de los suelos o tierras degradadas, más aún cuando se tiene poco tiempo de haber iniciado con estas prácticas de MSS.

LITERATURA CITADA

Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelo de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85-94.

Anderson, J. (1982). Measurement of CO2 evolution rates. En K. Alef & P. Nannipieri (Eds.), *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry* (pp. 831-871).

Arronis, V. (2022). Ganadería suplementación. *Fichas Técnicas. Bancos Forrajeros Cuba OM 22*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). *Carta Mundial de los Suelos*. Roma, Italia. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/293688/>

Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos*. Roma, Italia. [https://](https://rds.org.co/apc-aa-les/ba03645a7c069b5e-d406f13122a61c07/sueloa-i6874s.pdf)

rds.org.co/apc-aa-les/ba03645a7c069b5e-d406f13122a61c07/sueloa-i6874s.pdf.

Food and Agriculture Organization-Intergovernmental Technical Panel on Soils (FAO-ITPS). (2020). *Protocol for the assessment of sustainable soil management*. Roma, Italia. https://www.fao.org/fileadmin/useupload/GSP/SSM/SSMProtocol_EN006.pdf.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *FAOSTAT 2021*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

Fassbender, H. W. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales* (2a ed.). CATIE.

Forsythe, W. (1980). *Física de suelos. Manual de laboratorio*. IICA.

Franco, Q., Calero, D., & Durán, C. (2005). Evaluación de tecnologías por métodos participativos para la implementación de sistemas ganaderos sostenibles en el norte del departamento del

Valle del Cauca. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Universidad Nacional de Colombia.

Henríquez, C., & Cabalceta, G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. UCR, Facultad de Fitotecnia.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), & Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas (Minae). (2019). *Decreto 41960 metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras agroecológicas de Costa Rica*. Diario Oficial La Gaceta, 215.

Martínez, A. (2018). *Tabla de composición bromatológica de forrajes utilizados para la alimentación de animales en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.

Peech, L., Alexander, L. T., & Dean, L. A. (1974). *Methods of soil analysis fertility investigations*. USDA Circular No. 8.

USDA-NRCS. (2014). *Soil respiration. Soil Health - Guides for Educator Series*. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051573.pdf.

Vance, B., Brookes, P., & Jenkinson, D. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703-707.

Villalobos, L. (2020). *Fichas de forrajes. Red Nacional de Pastos y Forrajes*.

Walkley, A., & Black, C. A. (1938). An examination of the Degtiareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.

PLANIFICACIÓN PROSPECTIVA EN EL SECTOR AGROPECUARIO: INNOVACIÓN, TECNOLOGÍA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN COSTA RICA Y AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Fabián Campos Boulanger¹, Kattia Lines Gutiérrez²

RESUMEN

Planificación prospectiva en el sector agropecuario: innovación, tecnología y el desarrollo sostenible en Costa Rica y América Latina y el Caribe. La planificación prospectiva en el sector agrícola de América Latina y el Caribe es clave para anticipar y adaptarse a desafíos complejos, como el cambio climático y la transformación de mercados. Este enfoque permite crear estrategias sostenibles mediante prácticas como la diversificación de cultivos, la agricultura regenerativa y el uso de tecnologías de precisión. Para lograrlo, es esencial superar barreras culturales y estructurales, fomentar una cultura organizativa que valore la innovación y la colaboración interdisciplinaria. Además, la inclusión de mujeres y jóvenes como agentes de cambio fortalece la cohesión social y promueve la resiliencia al impulsar el emprendimiento y el uso de tecnologías digitales. La prospectiva facilita un sector agrícola preparado para enfrentar un futuro incierto al contribuir con la seguridad alimentaria y el desarrollo rural mediante alianzas entre instituciones, comunidades locales y centros de investigación. Este enfoque asegura un entorno agrícola competitivo, adaptativo y alineado con los objetivos de sostenibilidad.

Palabras clave: Planificación prospectiva, agricultura sostenible, cambio climático, resiliencia, involucramiento de actores.

Keywords: Prospective planning, sustainable agriculture, climate change, resilience, stakeholder engagement.

INTRODUCCIÓN

Según reporte del Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC (2021), el sector agropecuario de Costa Rica contribuyó con un 12 % al PIB y empleó a un 12 % de la población

activa). Este sector es esencial para la seguridad alimentaria, produciendo alimentos clave para el consumo nacional (MAG, 2024). Sin embargo, enfrenta desafíos críticos que afectan

1 Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR). Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. E-mail: fcampos@fundecor.org

2 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). San José, Costa Rica. E-mail: klines@inta.go.cr (autor para correspondencia). ORCID 0009-0001-8217-9205.

su sostenibilidad y adaptabilidad en el contexto de un entorno global en cambio constante.

Uno de los principales problemas es la brecha alimentaria, potenciada por el crecimiento poblacional y los cambios en los patrones de consumo hacia alimentos procesados y de origen animal, lo cual incrementa la demanda de recursos. Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2024), se estima que el país enfrenta un déficit en la producción de alimentos básicos que afecta especialmente a las comunidades más vulnerables. Estos factores, sumados a la urbanización, crecimiento demográfico y el cambio climático, afectan la disponibilidad de agua y tierras cultivables, pues limitan la capacidad de producción agrícola. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022). El INEC (2021) reporta que el 30 % de tierras agrícolas han sido urbanizadas, mientras que fenómenos climáticos, como sequías e inundaciones, han disminuido los rendimientos y encarecido los alimentos (Informe Nacional sobre Cambio Climático, 2019).

Según FAO (2018), para abordar estos problemas, se destacan la aplicación de prácticas agroecológicas y la incorporación de tecnologías avanzadas. Las prácticas agroecológicas, como la rotación de cultivos, ayudan a regenerar el suelo y aumentar la resiliencia ante fenómenos climáticos. Por otro lado, la agricultura de precisión, que utiliza drones y sensores, está en una fase inicial de adopción y es promovida por instituciones como la Universidad de Costa Rica y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) a través de proyectos y programas de capacitación. Sin embargo, la implementación es desigual, particularmente entre pequeños y medianos productores que carecen de recursos. La biotecnología, con cultivos más resistentes, enfrenta desafíos de aceptación social a pesar de un marco regulatorio desarrollado (MICITT, 2021).

Es fundamental una inversión en investigación, creación y revisión de políticas públicas,

desarrollo y capacitación agrícola. Las alianzas entre las universidades, los centros de investigación y el sector privado, pueden impulsar la innovación y tecnología en el campo (Asociación Nacional de Agricultores, (ANAP, 2021); para esto, resulta crucial la creación y aplicación de las políticas públicas tendientes a priorizar la modernización del sector, el acceso a la infraestructura, los mercados y la capacitación en tecnologías, además de fomentar la sostenibilidad de los sistemas productivos.

En este contexto, la planificación prospectiva emerge como una estrategia clave para anticipar cambios y establecer estrategias efectivas, la cual permite analizar riesgos, identificar oportunidades y facilitar decisiones estratégicas informadas. Implica la participación de agricultores, académicos, gobierno y sociedad civil para crear consensos en función de las prioridades de desarrollo desde una gestión integral del territorio que contemple el uso sostenible de la tierra y la protección de los recursos naturales.

Costa Rica refleja desafíos comunes en América Latina y el Caribe (ALC), donde el cambio demográfico y los patrones de consumo presionan a los sistemas agrícolas y pecuarios. La urbanización y el cambio climático agravan estos desafíos, haciendo urgente la adopción de prácticas sostenibles que promuevan la resiliencia y la seguridad alimentaria. La experiencia costarricense en agroecología y tecnologías avanzadas ofrece un modelo replicable en otros países de ALC.

El presente manuscrito explora la planificación prospectiva como una estrategia para enfrentar desafíos agropecuarios en Costa Rica y ALC. La sinergia entre tecnología, políticas efectivas y gestión de recursos se vislumbra como esencial para un futuro sostenible de los sistemas productivos de la región. Además, se subraya la importancia de integrar enfoques innovadores y colaborativos que permitan adaptar los modelos de producción a los cambios globales y locales.

CONTENIDO (ANÁLISIS)

La prospectiva como una forma de mirar el devenir

La prospectiva concibe el futuro no como un destino fijo, sino como un conjunto de posibilidades múltiples, al contrastar con enfoques deterministas y lineales. Esta perspectiva resalta el futuro como una construcción social y colectiva, moldeada por las decisiones presentes de los actores involucrados. Según Berger (1967), adoptar una visión prospectiva implica tomar acciones en el presente para orientar los futuros deseados, en vez de prever únicamente lo que puede suceder.

Un principio central de este enfoque es la pluralidad de futuros, que Michel Godet (2000) clasifica en posibles, probables y deseables. Los futuros posibles incluyen incluso eventos improbables, mientras que los probables se alinean con las tendencias actuales. En cambio, los futuros deseables responden a aspiraciones colectivas y son el foco de las estrategias prospectivas. Este pluralismo contrasta con visiones deterministas y permite abordar la incertidumbre sin depender solo de datos pasados.

Desde la visión prospectiva se enfatiza un horizonte temporal a largo plazo para gestionar la complejidad e incertidumbre. En escenarios más lejanos, los cambios son más inciertos y dependientes de múltiples factores —tecnológicos, climáticos, sociales y económicos—. Jiménez Cornejo (2015) sostiene que, cuanto más amplio sea el horizonte, mayor será la incertidumbre en la evolución de tendencias, lo cual demanda métodos sofisticados como el análisis de escenarios y el método Delphi para anticipar disrupciones.

La construcción de escenarios futuros es fundamental en la prospectiva, pues proporciona narrativas que permiten evaluar las interacciones complejas entre factores. Basado en la teoría de sistemas y el pensamiento complejo, este proceso muestra cómo las decisiones actuales

pueden impactar diferentes contextos futuros (Godet, 2000). Estos escenarios no solo proyectan posibles desarrollos, sino que sirven como herramientas reflexivas, ayudando a los actores a cuestionar sus presunciones actuales, preparar respuestas a contingencias e impulsar la innovación (Mojica, 2008).

Además, la prospectiva valora el futuro como una construcción participativa, incluye a múltiples actores para integrar diversas aspiraciones en los futuros diseñados. Esta participación asegura que los escenarios reflejen los intereses del sistema y promuevan un enfoque ético y social en la toma de decisiones. Jiménez Cornejo (2015) resalta la dimensión ética de la prospectiva, que persigue el bienestar colectivo y la justicia social mediante la inclusión de diversos stakeholders (colaboradores).

La relación prospectiva entre presente y futuro plantea una perspectiva estratégica en la cual el futuro ilumina el presente, a diferencia de enfoques tradicionales donde el pasado explica el futuro (Mojica, 2008). Este enfoque permite que las decisiones presentes se orienten de forma estratégica hacia los futuros deseados, promoviendo acciones proactivas y adaptativas ante la incertidumbre.

Breve acercamiento al origen de la planificación prospectiva

La prospectiva surge en la posguerra como respuesta a la necesidad de anticipar cambios profundos. En la década de 1950, Gastón Berger desarrolló en Francia un enfoque que proponía la prospectiva como herramienta para moldear futuros deseables mediante decisiones presentes. Este enfoque, que rechaza la linealidad del futuro, fue clave para concebir el futuro como un campo de posibilidades múltiples y orientar su análisis hacia la acción transformadora en lugar de la mera predicción (Berger, 1964).

Posteriormente, la prospectiva estratégica se consolidó como una extensión práctica, especialmente relevante en contextos de incertidumbre. En Estados Unidos, durante la Guerra Fría, la RAND Corporation empleó escenarios futuros para guiar decisiones en áreas militares y políticas. En Europa, Michel Godet estructuró formalmente la prospectiva en el ámbito corporativo y gubernamental al desarrollar metodologías como el análisis estructural y la matriz de impactos cruzados, que permitieron a las organizaciones adoptar estrategias adaptativas y resilientes (Godet, 1994).

La planificación prospectiva, al integrar múltiples escenarios, se convierte en una herramienta crítica para organizaciones en entornos de cambio acelerado. Un caso emblemático es el de Royal Dutch Shell en los 70s, que adoptó la planificación por escenarios para enfrentar la crisis del petróleo, logrando no solo sobrevivir sino consolidarse en el sector energético (Wack, 1985). En el sector público, países como Francia han utilizado la prospectiva para diseñar políticas adaptativas en áreas de tecnología, demografía y cambio climático, promoviendo decisiones resilientes orientadas al desarrollo sostenible (Godet, 2000).

En el contexto de zonas rurales, la prospectiva aborda desafíos específicos como la dependencia de los recursos naturales y la vulnerabilidad social y ambiental. En estos entornos, se emplea un enfoque participativo que permite a las comunidades involucrarse en la creación de futuros colectivos, integrando realidades locales en las estrategias de desarrollo. La prospectiva territorial facilita a los gobiernos regionales anticiparse a cambios y promover un desarrollo sostenible en infraestructura, tecnología agrícola y gestión ambiental. La participación comunitaria, esencial en este proceso, asegura que las estrategias se alineen con el contexto cultural, generando compromiso y cohesión entre actores locales (Durance, 2010).

Diferencias entre la planificación prospectiva y otros enfoques de planificación

La planificación prospectiva se distingue de otros enfoques en su capacidad de explorar y anticipar múltiples futuros posibles, permitiendo a las organizaciones tomar decisiones estratégicas en un contexto de alta incertidumbre. A diferencia de la planificación normativa, que se orienta hacia un solo futuro deseado con metas rígidas y predeterminadas, la prospectiva fomenta la flexibilidad mediante la creación de escenarios diversos. Mientras que la normativa se enfoca en alcanzar un ideal específico, la prospectiva reconoce la necesidad de adaptarse ante una variedad de contingencias y permite que este enfoque sea más adecuado para contextos impredecibles.

Comparada con la planificación estratégica, la prospectiva no se limita a las circunstancias presentes. La planificación estratégica se basa en un análisis exhaustivo del entorno actual mediante herramientas como el FODA para formular estrategias competitivas que respondan al mercado y al contexto. En cambio, la prospectiva dirige su mirada a un horizonte temporal más amplio, anticipando futuros cambiantes sin depender exclusivamente del análisis del entorno inmediato. Aunque ambos enfoques permiten adaptarse a cambios, la prospectiva sobresale en su orientación hacia futuros lejanos, donde la incertidumbre y complejidad son mayores.

Frente a la planificación reactiva, la prospectiva adopta una postura proactiva que se anticipa a posibles escenarios antes de que los cambios ocurran. La planificación reactiva, en contraste, responde a los desafíos una vez que se presentan, por lo que resulta útil en situaciones de crisis o emergencia en las que la organización no ha tenido tiempo de prever los cambios. Si bien la planificación reactiva permite responder rápidamente a eventos imprevistos, carece de la visión a largo plazo que caracteriza a la prospectiva, la cual permite una preparación integral ante posibles interrupciones futuras.

En cuanto a la planificación adaptativa, ambas comparten la flexibilidad como característica central, aunque su enfoque es distinto. La planificación adaptativa se fundamenta en ajustes continuos y en el aprendizaje organizacional para responder a un entorno en constante cambio. A diferencia de la prospectiva, que se orienta a anticipar múltiples futuros posibles mediante escenarios, la adaptativa responde de manera reactiva a cambios en el entorno conforme suceden y promueve un ajuste gradual más que una preparación estratégica para diferentes escenarios.

Finalmente, en relación con la planificación participativa, la prospectiva y este enfoque coinciden en que ambos pueden incluir a diversos actores en el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, la planificación participativa se centra en la cohesión social y la democracia en las decisiones, promueve la inclusión y el consenso entre los actores involucrados, especialmente en el desarrollo comunitario y en la creación de políticas públicas; es decir, acentúa el proceso humano que se da con la participación. Por su parte, la prospectiva prioriza la anticipación y construcción de futuros posibles sin dejar de lado la participación y la inclusión, las que son orientadas hacia la preparación estratégica en función de las incertidumbres del entorno.

Análisis de tendencias y “monitoreo de futuro” para la planificación prospectiva

Este proceso de planificación prospectiva inicia con la recolección sistemática de información mediante la vigilancia tecnológica y del entorno, utiliza metodologías como el *análisis PESTEL* para examinar factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales, identifica variables y áreas de análisis relevantes para los actores sociales. Posteriormente, se procede con el análisis de tendencias, empleando herramientas como el *benchmarking*, *revisión de literatura* y el *análisis de variables con plazos temporales definidos* (p.ej: como el incremento en la temperatura

o cambios en los patrones de precipitación que afectan cultivos y ganado) para identificar patrones y proyecciones significativas. Paralelamente, se lleva a cabo la búsqueda de “señales emergentes de cambio” mediante técnicas como el “*análisis del entorno mediato e inmediato*” y el *mapeo de actores*, que permiten detectar indicios tempranos de cambios emergentes. Toda esta información se integra y se interpreta utilizando metodologías como el *método Delphi* y la *prospectiva de escenarios*, conformando así un ciclo continuo que alimenta la estrategia organizacional y facilita la adaptación proactiva al futuro.

Planificación prospectiva y retos del sector agropecuario en Latinoamérica

La planificación prospectiva en el sector agropecuario de Centroamérica y América Latina busca anticipar desafíos y aprovechar oportunidades para mejorar la resiliencia y sostenibilidad en la producción agrícola y ganadera. En Centroamérica, países como Costa Rica han impulsado la sostenibilidad mediante la diversificación de cultivos y el uso de agroquímicos orgánicos mediante el Programa de Certificación de Agricultura Ecológica (MAG, 2024). Honduras ha implementado técnicas de conservación de suelos y cultivos de ciclo corto para adaptarse a la vulnerabilidad climática conocido como “Honduras 20/20” (FIDA, 2018), mientras que, Nicaragua utiliza tecnologías de información para apoyar la gestión agrícola (Saavedra, 2023). El Salvador, ante problemas de inseguridad alimentaria, ha promovido huertos comunitarios y agricultura urbana (Consejo Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional [CONASAN], 2011) y Guatemala apuesta por el manejo sostenible de recursos mediante la reforestación y el cultivo en terrazas (Fong, 2021).

En América Latina, diversos países implementan innovaciones para fortalecer sus sectores agropecuarios: Brasil adopta prácticas sostenibles en la producción de soja, Argentina usa drones y trazabilidad en la ganadería, Chile adapta su

viticultura al cambio climático con variedades resistentes (Salazar & Álvarez, 2024), Colombia diversifica cultivos y conecta a productores con mercados específicos (Philip et al., 2019), México promueve la agricultura familiar mediante agroecología y financiamiento (Instituto de Estudios para el Desarrollo Rural, 2022), y Perú fomenta sistemas agroforestales para proteger la biodiversidad y los recursos hídricos. Estas iniciativas reflejan cómo la planificación prospectiva se presenta como una herramienta clave para enfrentar desafíos climáticos, impulsar la innovación tecnológica y orientar el agro hacia un futuro sostenible y resiliente.

Barreras relacionadas con la adopción de prácticas prospectivas en las políticas y estructuras organizativas

La adopción de prácticas prospectivas en la extensión rural de América Latina y el Caribe (ALC) es esencial para enfrentar desafíos como el cambio climático, la transformación de mercados y las dinámicas sociales. Las instituciones de extensión agropecuaria deben desarrollar una visión a largo plazo para apoyar el futuro de la agricultura y las comunidades rurales, más allá de soluciones inmediatas (Cuervo & Guerrero, 2018).

Uno de los obstáculos principales es la resistencia al cambio dentro de las culturas organizativas, que a menudo priorizan métodos tradicionales las cuales pareciera no ser suficiente para atender las incertidumbres actuales. La superación de esta mentalidad implica fomentar un ambiente de experimentación y aprendizaje continuo. Además, las estructuras jerárquicas rígidas y burocráticas limitan la colaboración interdisciplinaria, necesaria para problemas complejos. Los equipos multifuncionales y redes de colaboración podrían facilitar la integración de diversas perspectivas.

La falta de recursos humanos y financieros es otro desafío. Sin personal capacitado en prospectiva, las decisiones se basan en suposiciones, por lo que es crucial invertir en formación y colaboración con universidades y centros de investigación.

También es vital el acceso a información confiable, donde las plataformas digitales pueden facilitar la recolección y difusión de datos y promueven un enfoque participativo.

La colaboración interinstitucional es fundamental; las políticas públicas deben estar integradas entre sectores y niveles de gobierno para maximizar su impacto en las comunidades rurales. FAO (2021) destaca la urgencia de estas prácticas prospectivas para fortalecer la sostenibilidad y resiliencia en ALC y así promover un desarrollo inclusivo y sostenible en un entorno incierto.

Planificación prospectiva y sus impactos en el sector agropecuario

La planificación prospectiva en el sector rural de América Latina y el Caribe es crucial para fortalecer la resiliencia y la sostenibilidad, pues aborda no solo dimensiones económicas y ambientales, sino también aspectos como la equidad de género y las expectativas de la juventud rural. Este enfoque permite anticipar tendencias y aplicar prácticas sostenibles, tales como la agricultura regenerativa y la diversificación de cultivos, mediante herramientas como el análisis de tendencias y la construcción de escenarios.

Para identificar patrones y riesgos, se emplean técnicas como el análisis de vulnerabilidad, que destaca amenazas como la escasez de agua y oportunidades en la adopción de cultivos resistentes a la sequía (FAO, 2018). La participación de actores clave en talleres y grupos de enfoque fomenta la colaboración, mientras que el uso de innovaciones tecnológicas, como riego eficiente y agricultura de precisión, mejora la sostenibilidad en los sistemas productivos. La formación y capacitación continua permiten a los agricultores adoptar prácticas adaptativas y sostenibles.

Además, la equidad de género es fundamental, ya que las mujeres en zonas rurales, a menudo limitadas en su acceso a recursos, juegan un papel clave en la producción agrícola, por lo que, el utilizar herramientas como la investigación

cualitativa y cuantitativa, para identificar barreras específicas que sirvan de insumo para la formulación de políticas inclusivas y programas de capacitación específicos, resulta fundamental. La inclusión de jóvenes en la planificación asegura la continuidad del sector agrícola, ofrece formación en habilidades técnicas y acceso a financiamiento

para emprendimientos rurales. Finalmente, promover el uso de tecnologías digitales y plataformas de colaboración puede contribuir a incentivar la innovación y el emprendimiento en el sector (ONU Mujeres, 2023; CEPAL, 2017; INTA, 2020).

CONCLUSIONES

Incorporación de la prospectiva como pilar estratégico para la resiliencia y sostenibilidad

La planificación prospectiva debe consolidarse como un pilar esencial en el sector agrícola para enfrentar los desafíos climáticos, sociales y económicos. Este enfoque permite anticiparse a múltiples escenarios y fortalece la capacidad de adaptación del sector. Al integrar análisis de riesgos y tendencias con herramientas participativas, la prospectiva facilita decisiones estratégicas que no solo garantizan la sostenibilidad ambiental, sino también la seguridad alimentaria y el desarrollo rural en un contexto de alta incertidumbre. Este cambio estratégico requiere inversión en innovación y el fomento de alianzas entre instituciones agrícolas, universidades y comunidades locales.

Transformación cultural y organizativa para adaptar la innovación rural

Para aprovechar el potencial de la planificación prospectiva, es necesario superar barreras culturales y estructurales en las instituciones rurales. La resistencia al cambio y la dependencia de métodos tradicionales limitan la innovación; por lo tanto, se requiere una transformación organizativa que fomente la experimentación, el aprendizaje continuo y la colaboración interdisciplinaria. Esta transformación implica capacitar a

equipos multifuncionales y crear redes de colaboración que permitan integrar conocimientos diversos y enfrentar problemáticas complejas. La flexibilidad organizativa es clave para que el sector agrícola responda de forma efectiva a cambios en los mercados, demandas sociales y condiciones ambientales, ya que asegura un enfoque estratégico y resiliente en todos los niveles de la cadena productiva.

Empoderamiento de mujeres y jóvenes como agentes de cambio en el sector agrícola

La planificación prospectiva debe integrar una perspectiva inclusiva que empodere a las mujeres y a las juventudes rurales, reconociéndolas como agentes de cambio. La equidad de género y la inclusión de los jóvenes no solo fortalecen la cohesión social en las comunidades rurales, sino que también impulsan la innovación y la eficiencia en el sector. La inversión en la capacitación de mujeres y jóvenes en técnicas de gestión, liderazgo y uso de tecnologías digitales crea un entorno agrícola más competitivo y sostenible. Al ofrecer acceso a financiamiento y promover el emprendimiento rural, estas poblaciones se convierten en catalizadores de un sector agrícola resiliente, diverso y adaptable a las exigencias del futuro, que maximiza el uso de recursos y promoviendo prácticas sostenibles en toda la región.

LITERATURA CITADA

- Ansoff, H. I. (1965). *Corporate Strategy*. McGraw-Hill.
- Asociación Nacional de Agricultores. (2021). Informe sobre innovación en el agro. http://www.sepsa.go.cr/docs/2021-008-Informe_Gestion_SectorAgro_2020-2021.pdf
- Berger, G. (1964). *Phénoménologie du temps et prospective*. PUF. <http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/phenominologietemps.pdf>
- Secretaría Ejecutiva de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2017). Planes de igualdad de género en América Latina y el Caribe Mapas de ruta para el desarrollo. Observatorio de Igualdad de Género de América Latina y el Caribe. Estudios No. 01. https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/planes_de_igualdad_de_genero_en_america_latina_y_el_caribe._mapas_de_ruta_para_el_desarrollo.pdf
- Consejo Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (CONASAN). (2011). *Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional*. San Salvador, El Salvador. 71 p.
- Cuervo, L. M., & Guerrero, F. (Eds.). (2018). *Prospectiva en América Latina: Aprendizajes a partir de la práctica*. En Seminario internacional “Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Construcción de Futuros para América Latina y el Caribe”, organizado en Santiago, del 18 al 20 de mayo de 2016, por el Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES) de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/1303cf0c-fc9a-4cf3-a865-17983d32b019/content>
- Drucker, P. (1974). *Management: Tasks, Responsibilities, Practices*. HarperCollins.
- Durance, P. (Ed.). (2010). *La prospective stratégique pour les territoires*. L'Harmattan.
- FAO. (2018). La iniciativa para ampliar la escala de la agroecología. <https://www.fao.org/agroecology/overview/scaling-up-agroecology-initiative/es/>
- FAO. (2018). El futuro de la alimentación y la agricultura: Vías alternativas hacia el 2050. Versión resumida. Roma, Italia. 64 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e2afea45-10be-4cab-a7e2-36508e77461b/content>
- FAO. (2021). *Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022* / CEPAL, FAO e IICA. – San José, C.R.: IICA, 2021. 132 p. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/ec3e9a9f-593e-4c55-85a3-b5eeefbeca839/content>
- FIDA. (2018). Proyecto de inclusión económica y social de pequeños productores rurales en la región noreste de Honduras PROINORTE. Informe principal y apéndices. 211 p. <https://webapps.ifad.org/members/lapse-of-time/docs/spanish/EB-2018-LOT-P-14-Rev-1-Informe-de-dise-o-del-proyecto.pdf>
- Fong García, M.A. (2021). *Estrategia Nacional para la Neutralidad de la Degradación de las Tierras en Guatemala, Centro América*. Informe Final de Consultoría. 37 p. https://www.unccd.int/sites/default/files/2023-10/Guatemala_LDN_%20TSP%20Final%20Report%20%28Spanish%29.pdf
- Freire, P. (1970). *Pedagogía del oprimido*. Siglo XXI. <https://www.freire.org/paulo-freire/>
- Garita Hernández, A. & Mesén Vega, R. 2020. *Manual de buenas prácticas para la integración efectiva de jóvenes en la agricultura familiar*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). San José, Costa Rica. https://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2019/Buenas_Practicas_Integracion_min_ed.pdf
- Godet, M. (1994). *From Anticipation to Action: A Handbook of Strategic Prospective*. UNESCO Publishing.
- Godet, M. (2000). *La caja de herramientas de la prospectiva estratégica*. Madrid: Ediciones Pirámide.
- Gyamfi, K. et al. (2024). *Agricultura 4.0: La revolución de la agricultura inteligente para un futuro sostenible*. Innovar o Morir.
- Informe Nacional sobre el Cambio Climático de Costa Rica. (2019). *Informe Nacional sobre el Cambio Climático de Costa Rica*. https://cambio-climatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/Informe_Labores_DCC_2019.pdf

INEC. (2021). Estadísticas sobre uso de tierras en Costa Rica. <https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2021-01.pdf>

Instituto de Estudios para el Desarrollo Rural Maya, A.C.; Subsecretaría de Autosuficiencia Alimentaria, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *Revoluciones agroecológicas en México*. Ciudad de México, México. <https://repositorio-alimentacion.conacyt.mx/jspui/bitstream/1000/160/1/Libro%20Agroecolog%C3%ADa%20web.pdf>

Jiménez Cornejo, D. (2015). *Planeación Prospectiva: Diseña el futuro de su organización*. Consultora Tesise Investigaciones.

MAG. (2024). Departamento de Producción Orgánica. San José, Costa Rica. https://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/estructura/oficinas/Dep.produccion-organica.html

MICITT.. (2021). Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2022-2027. San José, Costa Rica. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2023/06/Plan-Nacional-Ciencia-Tecnologia-Innovacion-2022-2027.pdf>

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021). *Estrategia nacional para la seguridad alimentaria*. recuperado de: https://ofinase.go.cr/wp-content/uploads/2021-009-plan_san_ods_2021-2025.pdf

IFAD. (2021). <https://lac-conocimientos-sstc.ifad.org/w/panorama-regional-de-la-seguridad-alimentaria-y-nutricional-en-am%C3%A9rica-latina-y-el-caribe-2021>

Mintzberg, H. (1994). *The Rise and Fall of Strategic Planning*. The Free Press. <https://www.penguinrandomhouse.com/books/175603/the-rise-and-fall-of-strategic-planning/>

Mojica, F. J. (2008). *Modelo de la Prospectiva Estratégica*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

ONU Mujeres - América Latina y el Caribe. (2023). *El liderazgo de las mujeres rurales impulsa la igualdad de género y el desarrollo sostenible*. <https://lac.unwomen.org/es/stories/noticia/2023/10/el-liderazgo-de-las-mujeres-rurales-impulsa-la-igualdad-de-genero-y-el-desarrollo-sostenible>

Philip, C. et al. (2019). *Análisis de la cadena productiva del cacao en Colombia*. <https://www.purdue.edu/colombia/partnerships/cacaoforpeace/docs/2019FinalCacaoReport-Spanish.pdf>

Porter, M. E. (1980). *Competitive Strategy*. The Free Press. Recuperado de: <https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=192>

Programa Estado de la Nación. (2022). <https://estadonacion.or.cr/esta-costa-rica-atendiendo-los-retos-para-garantizar-su-seguridad-alimentaria-y-nutricional/#:~:text=No%20se%20conocen%20datos%20m%C3%A1s,Chac%C3%B3n%20y%20Segura%2C%202021>

Robiglio, V. & Lin Chiang, M. (2021). Un análisis de los factores de éxito de los incentivos de conservación en el Perú genera lecciones aprendidas para la promoción de contratos de cesiones en uso para sistemas agroforestales. <https://worldagroforestry.org/blog/2021/09/30/un-analisis-de-los-factores-de-exito-de-los-incentivos-de-conservacion-en-el-peru>

Salazar, L. & Alvarez, L. (2024). Usando la teledetección para evaluar la sostenibilidad de un programa de sanidad agrícola en Perú. BID. Blog. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/usando-la-teledeteccion-para-evaluar-la-sostenibilidad-de-un-programa-de-sanidad-agricola-en-peru/>

Santos Valle, S., & Kienzle, J. (2021). *Agricultura 4.0: Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. FAO.

SINAC. (2020). *Informe sobre deforestación y su impacto en la agricultura* Universidad de Costa Rica. (2022). *Estudio sobre agricultura de precisión*.

Saavedra Montano, D. (2023). *Análisis del Sistema de Innovación en el Sector Agropecuario de Nicaragua*. Managua, Nicaragua. 33 p. <https://www.redinnovagro.in/pdfs/Estado%20actual%20del%20sistema%20de%20innovacion%20Nicaragua.pdf>

TOTVS. (2023). *Agricultura 5.0: Los impactos de la tecnología aplicada en el sector*. TOTVS LATAM.

Wack, P. (1985). *Scenarios: Uncharted Waters Ahead*. Harvard Business Review, 63(5), 73-89.

Weick, K. E. (1995). *Sensemaking in Organizations*. Sage Publications. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0170840604040679>