



ISSN 2215-2202

AGRONOMÍA COSTARRICENSE

REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

<https://revistas.ucr.ac.cr//index.php/agrocost>


Artículo científico

Modelos de regresión basados en variables biométricas para la predicción de la cosecha en banano (*Musa* AAA, cv. Gran Enano) en Guácimo, Limón, Costa Rica*

Claudia Lorena Cañas-Trochez^{1/**}, Thalita Barbosa-Vicente²

*Este trabajo forma parte del proyecto de grado o tesis para la obtención del título de Ingeniera Agrónoma para las dos autoras, denominado “Análisis de regresión entre variables biométricas de unidades productivas de banano (*Musa* AAA, cv. Gran Enano) a floración y a cosecha” Proyecto de Investigación de la Universidad EARTH.

**Autora para correspondencia. Correo electrónico: ccanas@earth.ac.cr

¹Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica. 

²Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica. 

DOI: <https://doi.org/10.15517/08p7gj67>

Recibido el 15 de mayo del 2024; Aceptado el 19 de agosto del 2024

Resumen

Introducción. La investigación orientada al desarrollo de modelos para predecir la curva de floración y parámetros clave de producción en banano ha mostrado avances notables. Sin embargo, aún se requieren modelos específicos que permitan estimar con precisión la cosecha del cultivo. **Objetivo.** Desarrollar un modelo basado en variables biométricas para la predicción de la cosecha en banano (*Musa* AAA), cultivar Gran Enano, bajo condiciones de trópico húmedo en Guácimo, Limón, Costa Rica. **Materiales y métodos.** Se realizó un estudio correlacional en una finca comercial de la Universidad EARTH entre marzo y julio de 2023. Se evaluaron 347 unidades productivas distribuidas en 10,3 hectáreas. Se midieron variables biométricas como altura de planta, circunferencia del pseudotallo y número de hojas, tanto en la planta madre como en el hijo de sucesión. Las variables de cosecha incluyeron peso del racimo, número de manos, longitud y calibre del dedo central de la segunda y penúltima mano. Se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple sin intercepto para todas las variables dependientes, con validación de supuestos. **Resultados.** La altura y la circunferencia del pseudotallo de la planta madre presentaron las correlaciones más fuertes y significativas con las variables de cosecha. El modelo más eficaz fue el segundo diseñado para predecir el peso del racimo (mod2_peso), que generó la ecuación: $Peso = 0,13CircunferenciaM + 6,06AlturaM + 0,46CircunferenciaH - 9,38HojasH - 0,63AlturaH$ con un R^2 de 0,96 donde M indica la planta madre y H el hijo de sucesión.

Conclusiones. El análisis reveló correlaciones significativas entre variables de la planta madre y parámetros de cosecha. Se resalta la importancia de considerar también las características biométricas del hijo de sucesión, y que el coeficiente de determinación (R^2) no debe emplearse como único criterio de validación en modelos de regresión múltiple.

Palabras clave: Regresión múltiple; estudio de correlación; producción; validación; biometría.

Research Article

Abstract

Regression models based on biometric variables for the prediction of banana harvest (*Musa* AAA, cv. Gran Enano) in Guácimo, Limón, Costa Rica

Introduction. Research focused on developing models to predict flowering curves and key production parameters in banana has made notable progress. However, there is still a need for specific models capable of accurately estimating crop harvest. **Objective.** To develop a model based on biometric variables for predicting harvest in banana (*Musa* AAA), cultivar Gran Enano, under humid tropical conditions in Guácimo, Limón, Costa Rica. **Materials and methods.** A correlational study was conducted on a commercial farm owned by EARTH University between March and July 2023. A total of 347 productive units were evaluated across 10.3 hectares. Biometric variables such as plant height, pseudostem circumference, and number of leaves were measured on both the mother plant and the following ratoon. Harvest variables assessed included bunch weight, number of hands, finger length, and finger diameter for both the second and penultimate hands. A multiple linear regression model without intercept was applied to all dependent variables, with assumption validation procedures. **Results.** The height and pseudostem circumference of the mother plant showed the strongest and most significant correlations with harvest variables. The most effective model, based on assumption validation, was the second model designed for bunch weight prediction (mod2_peso), which produced the following equation: $Peso = 0.13CircunferenciaM + 6.06AlturaM + 0.46CircunferenciaH - 9.38HojasH - 0.63AlturaH$, with an R^2 of 0.96, where M denotes the mother plant and H the follower (ratoon) plant. **Conclusions.** The analysis revealed a significant correlation between mother plant variables and various harvest-related parameters. The results highlight the importance of considering the biometric characteristics of the follower (ratoon) plant in predictive models. Furthermore, the coefficient of determination (R^2) should not be used as the sole criterion for validating multiple linear regression models.

Keywords: multiple regression; correlation study; production; validation; biometry.

Introducción

El banano (*Musa AAA*) se destaca como una de las frutas más consumidas y exportadas como producto fresco. En la última década, Ecuador, Filipinas y Costa Rica han liderado las exportaciones de banano, mientras que Estados Unidos, Alemania y Bélgica fueron los principales destinos de importación del banano (López Guerrero 2017). Esto se debe a su destacado potencial agrícola y a sus cualidades nutritivas, que incluyen la contribución de vitaminas, minerales y otros componentes que desempeñan un papel fundamental en la mejora de la seguridad alimentaria en diversas naciones (Martínez Solórzano y Rey Brina 2021).

El Cultivar Gran Enano, perteneciente al subgrupo Cavendish, destaca como el más importante en la gran región Caribe, tanto por el área sembrada con este cultivar como por el volumen comercializado (Robinson y Galán Saúco 2010). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 2020), el 15% de toda la producción de banano se destina a la exportación, mientras que el restante se consume internamente. Este incremento en la demanda, impulsado por el crecimiento poblacional en los países productores y exportadores, ha otorgado al sector bananero una mayor relevancia económica y social, lo que exige la implementación de innovaciones y avances tecnológicos para mejorar la producción (Soto 2011).

La mayoría de las investigaciones en el cultivo de banano se centran en evaluar parámetros biométricos para diferenciar resultados positivos asociados con prácticas como la fertilización orgánica, el manejo integrado de plagas y la aplicación de riego controlado que mejoran la circunferencia del pseudotallo y el número de manos por racimo (Pramanik *et al.* 2024). En ese sentido, Villareal *et al.* (2013) crearon un índice de calidad del suelo basado en variables biométricas como circunferencia del pseudotallo, altura del hijo y características edafológicas en fincas de Panamá. Padilla Arroyo (2022) utilizó variables biométricas para determinar el ciclo de deshija más efectivo. Estos estudios destacan la importancia de aplicar principios matemáticos e incluir el uso de variables biométricas del cultivo de banano.

Los modelos matemáticos son fundamentales en la agricultura, ya que permiten calcular costos, ingresos y gastos, y brindan información crucial para la toma de decisiones en el manejo del cultivo y la producción (Torres Castillo 2021). El avance en la agricultura y en las herramientas computacionales ha promovido el desarrollo de modelos que predicen el comportamiento de los cultivos en condiciones específicas, lo que mejora la eficiencia agrícola (González *et al.* 2018).

En el cultivo del banano, se aplican modelos como CROPWAT, que define la cantidad de agua necesaria según la época del año y la evapotranspiración del cultivo (ETc), lo que optimiza el uso del recurso hídrico y maximiza el rendimiento (Toro Trujillo *et al.* 2016).

Además, el modelo de Campbell predice la respuesta poblacional de *Chaetanaphothrips signipennis* (Insecta: Thysanoptera) en banano orgánico en función de la temperatura (Estrada Macalupú 2022). En 2021, la exportación de banano en América Latina y el Caribe disminuyó un 3%, afectada por desequilibrios en la oferta, la demanda y la crisis global (FAO 2022). La inconformidad en los precios y pérdida del mercado de importadores provocó desperdicios significativos de banano y el colapso de los productores vulnerables, especialmente en Ecuador. Ese mismo año, Ecuador junto con otros países, firmaron el Acuerdo Regional por la Responsabilidad Compartida, cuyo objetivo fue solicitar a los principales mercados de importación un ajuste en los precios de la caja de banano, en función de la realidad internacional (FAO 2022). Por esta razón, pronosticar con precisión la productividad se vuelve una ventaja y una necesidad cada vez más urgente en el cultivo del banano.

Existen modelos de predicción diseñados para anticipar el comportamiento y rendimiento de cereales como arroz, maíz, sorgo y trigo. Estos modelos (basados en simulaciones) permiten desarrollar estrategias para la optimización de estos cultivos. No obstante, Hernández Córdova *et al.* (2015) señalan la persistencia de vacíos en la investigación de estos granos, como el contenido de nitrógeno en grano, la biomasa total y el tallo, áreas en las que la información recopilada no es consistente y que son cruciales para los cultivos. La información reunida se prevé que sirva como base para la formulación continua de modelos predictivos. Además, Bóveda (2018) desarrolló un modelo para estimar los volúmenes de producción y la distribución del tamaño de los frutos en mandarinas, lo que fomenta nuevas investigaciones en cultivos de interés.

A pesar de que se han reportado investigaciones sobre el desarrollo de modelos para la predicción de la curva de floración del banano y parámetros de producción determinantes en la calidad del producto final, la investigación sobre modelos para predecir la cosecha de banano es escasa. En una investigación desarrollada por Chacín *et al.* (2005) en la que se evaluaron 22 variables asociadas al rendimiento para la predicción de la cosecha en plátanos *Musa* (AAB) “Hartón” mediante modelos de regresión (Forward y Stepwise), se encontró que cinco variables demostraron ser significativas para explicar la predicción bajo el método Stepwise. Las variables biométricas de cosecha se vuelven relevantes debido al impacto asincrónico en la floración del banano, lo que plantea desafíos para los productores. Dada la falta de información específica sobre la relación entre las variables biométricas a floración y cosecha en el cultivo de banano, el objetivo de la presente investigación fue desarrollar un modelo de regresión basado en variables biométricas para la predicción de la cosecha en banano (*Musa* AAA) del cultivar Gran Enano en el trópico húmedo de Guácimo, Limón, Costa Rica.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se realizó en los cables 59 y 60 del bloque cuatro del área destinada a la producción de banano comercial del cultivar Gran Enano en la Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica (**Figura 1**), la cual presenta una temperatura promedio anual de 24,66°C, humedad relativa promedio anual de 89,67% y precipitación anual de 2410,90 mm (Universidad EARTH 2023). Durante el período de investigación (marzo – mayo del 2023), la temperatura promedio fue de 25,12°C, con una variación entre 22,49°C y 28,54°C, y la precipitación acumulada fue de 205,65 mm. La localización geográfica del proyecto de investigación se encuentra entre las coordenadas 10°12'51" N 83°35'21" W con una elevación aproximada de 35 msnm (Google EARTH 2020).

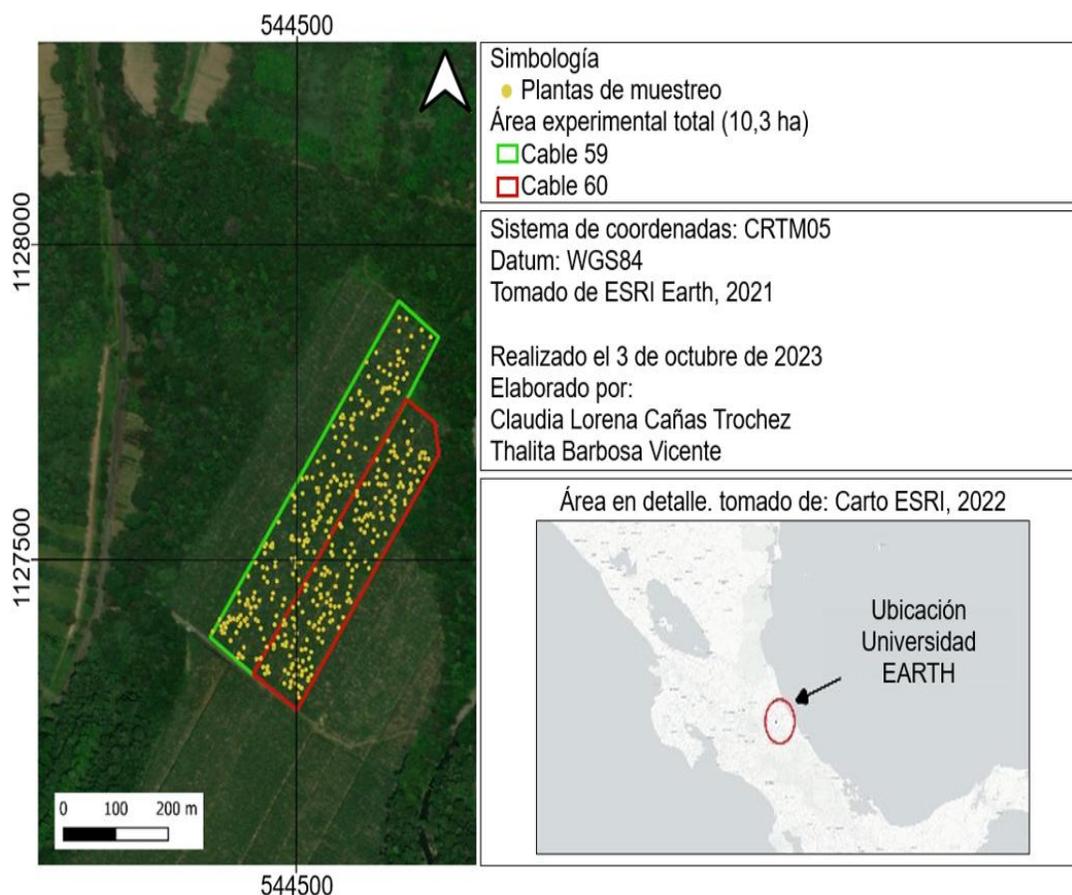


Figura 1. Áreas experimentales evaluadas en la finca de banano comercial, Universidad EARTH, marzo – julio, 2023.

Figure 1. Experimental areas assessed within the commercial banana farm, EARTH University, March – July 2023.

La zona experimental se ubica en la Región del Caribe de Costa Rica, específicamente, en las llanuras del noroeste. En esta área, los suelos suelen caracterizarse por un buen drenaje, texturas variadas que incluyen franco arenoso, franca y franco limoso, y una presencia ocasional de arcillas y pedregosidad. Desde una perspectiva taxonómica, los suelos predominantes en estas llanuras se clasifican como Inceptisoles y Andisoles (Arias *et al.* 2010). La **Tabla 1** muestra los resultados de los análisis de suelos realizados en la finca, que incluyen la determinación del pH, la acidez extractable y las concentraciones de macronutrientes y micronutrientes (extraídos con Mehlich III) en los dos cables.

Tabla 1. Parámetros de fertilidad del suelo obtenidos en las áreas experimentales (Cables 59 y 60).
Table 1. Soil fertility parameters obtained from the experimental areas (Cables 59 and 60).

Parámetro [Unidades]	Cable 59	Cable 60
pH	5,46	6,46
Acidez Extractable [cmol(+) kg ⁻¹]	0,22	0,11
Fósforo [mg L ⁻¹]	18	10
Potasio [cmol(+) kg ⁻¹]	2,08	1,85
Calcio [cmol(+) kg ⁻¹]	5,88	11,4
Magnesio [cmol(+) kg ⁻¹]	2,5	4,35
Hierro [mg L ⁻¹]	79	62
Cobre [mg L ⁻¹]	3,2	4,9
Zinc [mg L ⁻¹]	4	15,2
Manganeso [mg L ⁻¹]	19	22
Boro [mg L ⁻¹]	0,73	0,42

Diseño del estudio

El presente estudio fue del tipo correlacional, para el cual se seleccionaron 400 unidades productivas (planta madre más hijo de sucesión) en el inicio de la floración de uno a siete días de haber emergido la inflorescencia. Adicionalmente, se consideró como criterio de selección de las plantas la existencia de un hijo de sucesión con una altura mayor o igual a 1 m. Las plantas evaluadas fueron debidamente georreferenciadas y rotuladas para el control en la medición de los datos.

Las 400 unidades se dividieron en cuatro grupos de 100 unidades productivas cada uno. Durante el cultivo de banano, cada semana se asignó una cinta de cosecha de color distinto. Se realizó un inventario para identificar los colores de cinta asignados a cada grupo. El color de la cinta estuvo sujeto al calendario de cosecha establecido en la finca comercial, en este caso, el calendario del bloque cuatro, que fue el área seleccionada para el desarrollo de la investigación. La evaluación de las unidades productivas a floración se realizó durante las semanas 13, 14, 15 y 17 del calendario ordinario para el 2023, con un grupo de unidades productivas evaluado cada semana.

El número de unidades productivas seleccionado para la investigación se justificó por el área de trabajo (10,3 hectáreas) y el promedio de unidades productivas por hectárea (1750) del bloque cuatro de la finca comercial, para un total aproximado de 18 000 plantas disponibles para la investigación.

Descripción de actividades

La primera parte de la investigación inició con la selección de 400 unidades productivas con la planta madre en estadio inicial de floración que fueron rotuladas con tiza para asignar identificación. Adicionalmente, se utilizó pintura de aceite para facilitar la detección en campo. Después, las plantas fueron georreferenciadas con un GPS *GPSMAP 64s* (Garmin, Olathe, KS, USA). Se realizó la medición de las variables biométricas de las plantas a floración y sus hijos de sucesión.

Las variables medidas en las plantas madre fueron: circunferencia del pseudotallo (cm) a una altura de 100 cm, altura total (m) medida desde la base hasta la formación “V” de la última hoja emitida y el número de hojas. En los hijos de sucesión, las variables recolectadas fueron: circunferencia del pseudotallo (cm) a una altura de 100 cm, altura total (m) medida desde la base hasta la formación “V” de la última hoja emitida y número de hojas verdaderas, las cuales se definieron como aquellas con un ancho igual o superior a 10 cm. Dicha mediciones se realizaron siguiendo los lineamientos disponibles en el estudio de Zakaria *et al.* (2018).

La segunda parte de la investigación se llevó a cabo durante la cosecha, aproximadamente 11 semanas después de la floración, momento en el cual cada planta se cosechó según su edad. Las variables biométricas evaluadas incluyeron el número de manos por racimo, el peso en kilogramos de cada racimo (medido con una balanza tipo *hanging scales*), y el calibre y largo de la segunda y penúltima mano del racimo, específicamente, en el dedo central de cada una, con un calibrador bananero tipo *dial* (con unidades de 1/32") y una cinta métrica graduada en milímetros.

La selección de estas variables se basó en que los racimos cosechados en función de la exigencia mínima de empaque para la última mano tienden a un menor peso que aquellos cosechados con la segunda mano (Vargas Calvo 2012).

Para el ingreso y organización de los datos se diseñó un documento en Excel, que contuvo la información con la que se realizaron los respectivos análisis estadísticos de variables biométricas de plantas a floración e hijos de sucesión. Posteriormente se registraron variables biométricas de cosecha.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo para cada variable vegetativa (independiente) de cada unidad de producción. Después de concluir la recolección de datos asociados a las variables biométricas de cosecha, se procedió con el análisis de correlación entre cada variable medida en la investigación. Este análisis permitió conocer dirección y el grado de la relación lineal entre pares de variables de floración y cosecha, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson. Adicionalmente, se verificó la significancia de cada una de las correlaciones.

El desarrollo del análisis estadístico, se asignó una nomenclatura específica a cada variable independiente y dependiente utilizada en la investigación. En la **Tabla 2**, se observa la descripción de las variables vegetativas, mientras que en la **Tabla 3**, se presenta las variables de cosecha con su respectiva descripción.

Se analizó la información recopilada mediante el análisis de correlación entre cada variable. Se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple sin intercepto, esto debido a que en esta investigación el intercepto no tiene una interpretación práctica. El análisis se realizó para evaluar la relación entre cada variable dependiente (cosecha) y todas las variables independientes (vegetativas). Este proceso generó un primer modelo (modelo uno) para cada variable, a partir del cual se identificaron las variables significativas y no significativas. Con las variables significativas, se desarrolló un segundo modelo (modelo dos), el cual fue evaluado en función de su bondad de ajuste.

Se realizó una validación de los supuestos asociados al análisis estadístico en modelos de regresión lineal múltiple, enfocándose en la evaluación gráfica de la normalidad y la homocedasticidad de los residuos. Además, se llevó a cabo un diagnóstico de la linealidad y la detección de puntos atípicos. Estos análisis permitieron evidenciar la relación entre los residuos del modelo y los valores predichos. Para garantizar la confiabilidad de los modelos, fue esencial interpretar correctamente los gráficos, lo que facilitó la inferencia sobre el cumplimiento de los supuestos en cada modelo planteado.

El diagnóstico de linealidad tiene como objetivo evaluar si los residuos no muestran patrones sistemáticos, lo cual es indicativo de una relación lineal adecuada entre las variables. En contraste, el supuesto de normalidad se evalúa comprobando si los residuos siguen una distribución normal, generalmente utilizando gráficos Q-Q donde se espera que los puntos se alineen con la línea de referencia.

Tabla 2. Descripción de nomenclatura y unidad de medida para las variables vegetativas.

Table 2. Description of nomenclature and unit of measurement for vegetative variables.

Variable	Nomenclatura	Unidad de medida
Circunferencia del pseudotallo de la planta madre	CircunferenciaM	cm
Altura de la planta madre	AlturaM	cm
Número de hojas presentes en la planta madre	HojasM	unidades
Circunferencia del pseudotallo del hijo de sucesión	CircunferenciaH	cm
Altura del hijo de sucesión	AlturaH	cm
Número de hojas verdaderas en el hijo de sucesión	HojasH	unidades

La homocedasticidad (otro supuesto estadístico importante) se refiere a la igualdad de varianzas de los residuos a lo largo de los valores predictores, y se espera que los residuos se distribuyan de manera uniforme a lo largo de estos. Por último, los valores atípicos se identificaron a través de diagnósticos como la 'distancia de Cook' (Kim 2015), aunque su consideración final como atípicos queda a discreción del investigador.

Tabla 3. Descripción de nomenclatura y unidad de medida para las variables de cosecha.

Table 3. Description of nomenclature and unit of measurement for harvest variables.

Variable	Nomenclatura	Unidad de medida
Peso del racimo	Peso	kg
Número de manos del racimo	Manos	unidades
Calibre del racimo (segunda mano)	Calibre1	mm
Calibre del racimo (penúltima mano)	Calibre2	mm
Longitud de la segunda mano del racimo	Largo1	cm
Longitud de la penúltima mano del racimo	Largo2	cm

Concluida la validación de los supuestos, se identificaron las variables dependientes confiables y validadas para la predicción de la cosecha en el cultivo de banano. A partir de esto, se formuló la ecuación general para los modelos de regresión lineal múltiple, con el método de mínimos cuadrados ordinarios (Ferre Jaén 2019). Dicha ecuación se describe de la siguiente forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 . . . + \beta_k X_k + \epsilon \quad (1)$$

Donde:

y = es la variable dependiente que se desea predecir

X_k = variables independientes (vegetativas)

β_0 = intercepto

β_k = coeficientes de regresión

ϵ = error del modelo que representa la variabilidad no explicada por el modelo

Se realizó también la medición de la raíz de error cuadrado medio (RMSE), que es reconocido como un indicador para evaluar el rendimiento y la precisión del modelo predictivo de regresión establecido. El RMSE se enfoca en medir la discrepancia entre los valores predichos por el modelo y los valores reales, lo que permite evaluar la precisión de las predicciones. Esta medición se realiza a partir de la ecuación general para calcular el error cuadrático medio (RMSE) (Fitzgerald 2015). Lo anterior se detalla en la ecuación 2:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

Donde:

n = número de observaciones

y_i = valor observado real en la posición i

\hat{y}_i = valor predicho por el modelo en la posición i

La expresión $(y_i - \hat{y}_i)^2$ representa la diferencia al cuadrado entre el valor observado y el valor predicho para cada observación.

Es importante mencionar que todo el proceso de análisis estadístico anterior se realizó mediante el lenguaje de programación R, con el entorno de desarrollo integrado RStudio (R Core Team 2022).

Resultados

Selección de plantas a floración

En la implementación del diseño experimental, se estimó un tamaño de muestra con un 6,5% más de unidades recomendadas, como una medida de prevención ante potenciales pérdidas considerables al tamaño muestral sugerido. Se obtuvo una pérdida de 38 de unidades productivas debido a la práctica de debunching realizada con base en un criterio establecido por la Finca Comercial de Banano de la Universidad EARTH (racimo con menos de 6 manos verdaderas). En la investigación, se registró la pérdida de una planta que sufrió volcamiento y, durante el proceso de cosecha, se excluyeron del estudio otras 14 plantas, ya que habían sido cosechadas antes de la fecha indicada.

Se evaluaron las 347 unidades productivas restantes, que correspondieron al 92,5% del tamaño muestral mínimo establecido en la metodología. En el análisis exploratorio, se calcularon también los valores promedio y la desviación estándar de cada variable. En la **Tabla 4**, se muestran los valores de todas las variables analizadas.

Tabla 4. Análisis exploratorio valores promedio y desviación estándar de todas las variables evaluadas.**Table 4.** Exploratory analysis of mean values and standard deviation of all assessed variables.

Variable (Unidades)	Promedio	Desviación Estándar (DE)
CircunferenciaM (cm)	70,92	6,96
AlturaM (cm)	24,93	7,38
HojasM (unidades)	3,5	0,27
CircunferenciaH (cm)	1,73	0,36
AlturaH (cm)	12,02	1,22
HojasH (cm)	4,22	2,06
Manos (unidades)	7,15	0,72
Peso (kg)	23,1	5,25
Calibre1 (mm)	42,52	2,69
Calibre2 (mm)	39,87	2,34
Largo1 (cm)	23,05	1,9
Largo2 (cm)	20,33	2,13

Correlación entre variables biométricas

Las variables independientes que se correlacionaron significativamente con más variables dependientes fueron la circunferencia y la altura de la planta madre. La circunferencia de la planta madre se correlacionó positivamente con el número de manos (0,28), el peso del racimo (0,35), el largo del dedo central de la segunda mano (0,23) y el largo del dedo de la penúltima mano del racimo (0,11) (**Figura 2**). La altura de la planta madre se correlacionó positivamente con el número de manos (0,34), el peso del racimo (0,38), el calibre del dedo central de la segunda mano (0,14), el largo del dedo central de la segunda mano (0,26) y el largo del dedo de la penúltima mano del racimo (0,11).

Se encontraron también correlaciones significativas entre las variables vegetativas. Por ejemplo, entre las variables de altura y circunferencia del hijo de sucesión (0,89), entre cantidad de hojas y circunferencia del hijo de sucesión (0,83), entre altura de la planta madre y altura del hijo de sucesión (0,46), entre altura y circunferencia de la planta madre y circunferencia del hijo de sucesión (0,44). Se observaron también correlaciones significativas entre las variables de cosecha como las observadas entre el peso del racimo y el número de manos (0,66), el calibre1 y el calibre2 (0,60), el peso del racimo y el calibre1 (0,55), el peso del racimo y el calibre2 (0,49) y, por último, el largo1 y el largo2 (0,43).

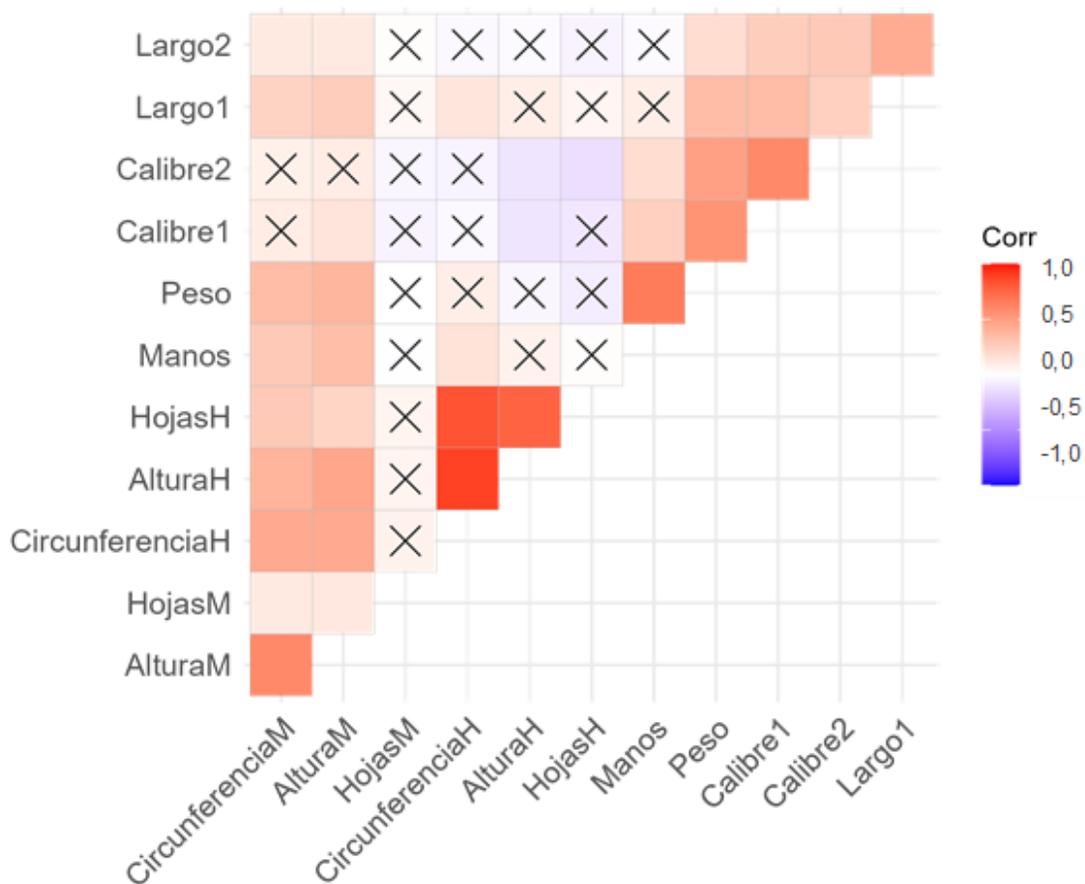


Figura 2. Matriz de correlaciones entre las variables biométricas del cultivo del banano evaluadas en el presente estudio. Las correlaciones que presentan X no fueron significativas ($p < 0,05$).

Figure 2. Matrix of correlations between the banana crop biometric variables evaluated in present study. The correlations with X were not significant ($p < 0.05$).

Análisis de regresión entre las variables biométricas a floración y a cosecha

El modelo de regresión lineal múltiple utilizado en la presente investigación permitió evaluar la significancia de las variables vegetativas en relación con cada variable dependiente. Se emplearon dos enfoques en la construcción de los modelos. Inicialmente, se incluyeron todas las variables independientes (vegetativas) en el análisis, el cual fue denominado modelo uno y evidenció altos coeficientes de determinación (R^2).

Posteriormente, al aplicar un enfoque de regresión backward, se seleccionaron únicamente las variables independientes significativas, lo que generó el modelo dos o modelo final.

En la **Tabla 5**, se observa el modelo dos desarrollado para las variables dependientes estudiadas, en el cual las variables de número de manos, largo uno, calibre uno y calibre dos, presentaron un R^2 de 0,99. En contraste, la variable de largo dos mostró un R^2 de 0,98 y la variable peso un R^2 de 0,96.

Análisis y validación de supuestos

En la etapa final de la investigación, se evaluaron los supuestos asociados a los modelos de regresión lineal múltiple planteados. Este análisis es fundamental para garantizar la validez de las inferencias y la calidad de los modelos (Buenaño Cordero *et al.* 2011). En ese sentido, la evaluación se centró en dos supuestos clave: la normalidad y la homocedasticidad de los residuos. Además, se realizó un diagnóstico gráfico preliminar para verificar la linealidad de las relaciones y detectar puntos atípicos. Tras la evaluación, se observó que los modelos correspondientes a número de manos (mod2_manos, **Figura 3**), calibre uno (mod2_cal1, **Figura 5**), calibre dos (mod2_cal2, **Figura 6**), largo uno (mod2_lar1, **Figura 7**) y largo dos (mod2_lar2, **Figura 8**) no cumplieron completamente con los supuestos requeridos para un análisis robusto. Esto sugiere que estos modelos podrían requerir ajustes, transformaciones de los datos o que la interpretación de sus resultados debe considerar estas limitaciones

Por otro lado, el modelo asociado al peso del racimo (mod2_peso, **Figura 4**) mostró un mayor cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Los residuos están distribuidos de manera dispersa, sin patrones claros de heterocedasticidad o relación no lineal, lo que sugiere que el supuesto de homocedasticidad se cumple adecuadamente. Además, los residuos se alinean bien con la línea de referencia, lo que indica un cumplimiento aceptable del supuesto de normalidad. La distribución aleatoria de los residuos refuerza los supuestos de linealidad y homocedasticidad, lo cual sugiere una mayor confiabilidad en su interpretación. Este modelo fue notable por incluir como variables independientes significativas las tres variables vegetativas del hijo de sucesión, junto con dos variables de la planta madre.

Tabla 5. Modelos de regresión lineal múltiple (sin intercepto) para las distintas variables dependientes y su correspondiente coeficiente de determinación (R^2).

Table 5. Multiple linear regression models (without the intercept) for different dependent variables with their corresponding coefficient of determination (R^2).

Modelo	Variable dependiente	Variables independientes	R^2	Variables significativas
mod2_manos	Manos	CircunferenciaM †	0,9904	Todas
		AlturaM †		
		HojasM		
		AlturaH		
mod2_peso	Peso	CircunferenciaM †	0,9647	Todas
		AlturaM †		
		CircunferenciaH		
		AlturaH HojasH		
mod2_lar1	Largo uno	CircunferenciaM †	0,9921	Todas
		AlturaM †		
		HojasM		
mod2_lar2	Largo dos	CircunferenciaM †	0,9872	Todas
		AlturaM †		
		HojasM		
		CircunferenciaH		
mod2_cal1	Calibre uno	CircunferenciaM †	0,9931	Todas
		AlturaM †		
		HojasM		
mod2_cal2	Calibre dos	CircunferenciaM †	0,9934	Todas
		AlturaM †		
		HojasM		

† Variable significativa repetida en todos los modelos.

En comparación con los otros, el modelo de peso del racimo presentó un mejor ajuste en términos de los supuestos de regresión múltiple. Aunque existen algunos valores atípicos o puntos influyentes, el modelo puede considerarse más confiable para la interpretación.

Modelo de regresión obtenido

El modelo de regresión que mostró un mayor cumplimiento de los supuestos fue el del peso del racimo (mod2_peso), obtenido mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. La ecuación resultante, sin intercepto, permite la predicción del rendimiento en cosecha de cada planta del cultivo de banano del cultivar Gran Enano. En la interpretación de la ecuación:

$$\text{Peso} = 0,13 \text{ CircunferenciaM} + 6,06 \text{ AlturaM} + 0,46 \text{ CircunferenciaH} - 9,38 \text{ AlturaH} - 0,63 \text{ HojasH}$$

Se observó que, por cada cm adicional en la circunferencia de la planta madre (CircunferenciaM), el peso del racimo aumentó en promedio 0,13 kg. También, se observó que por cada m adicional en la altura de la planta madre (AlturaM), se obtenía un incremento de 6,06 kg; mientras que un incremento de un cm adicional en la circunferencia del pseudotallo del hijo (CircunferenciaH) representó un aumento es de 0,46 kg. En cambio, por cada m adicional en la altura de planta del hijo (AlturaH), el peso disminuye 9,38 kg, y por cada hoja adicional del hijo (HojasH), el peso disminuye 0,63 kg. En este contexto, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) de la ecuación se determinó en 4,41 kg, lo que representa la medida de la discrepancia promedio entre los valores observados y los predichos por el modelo.

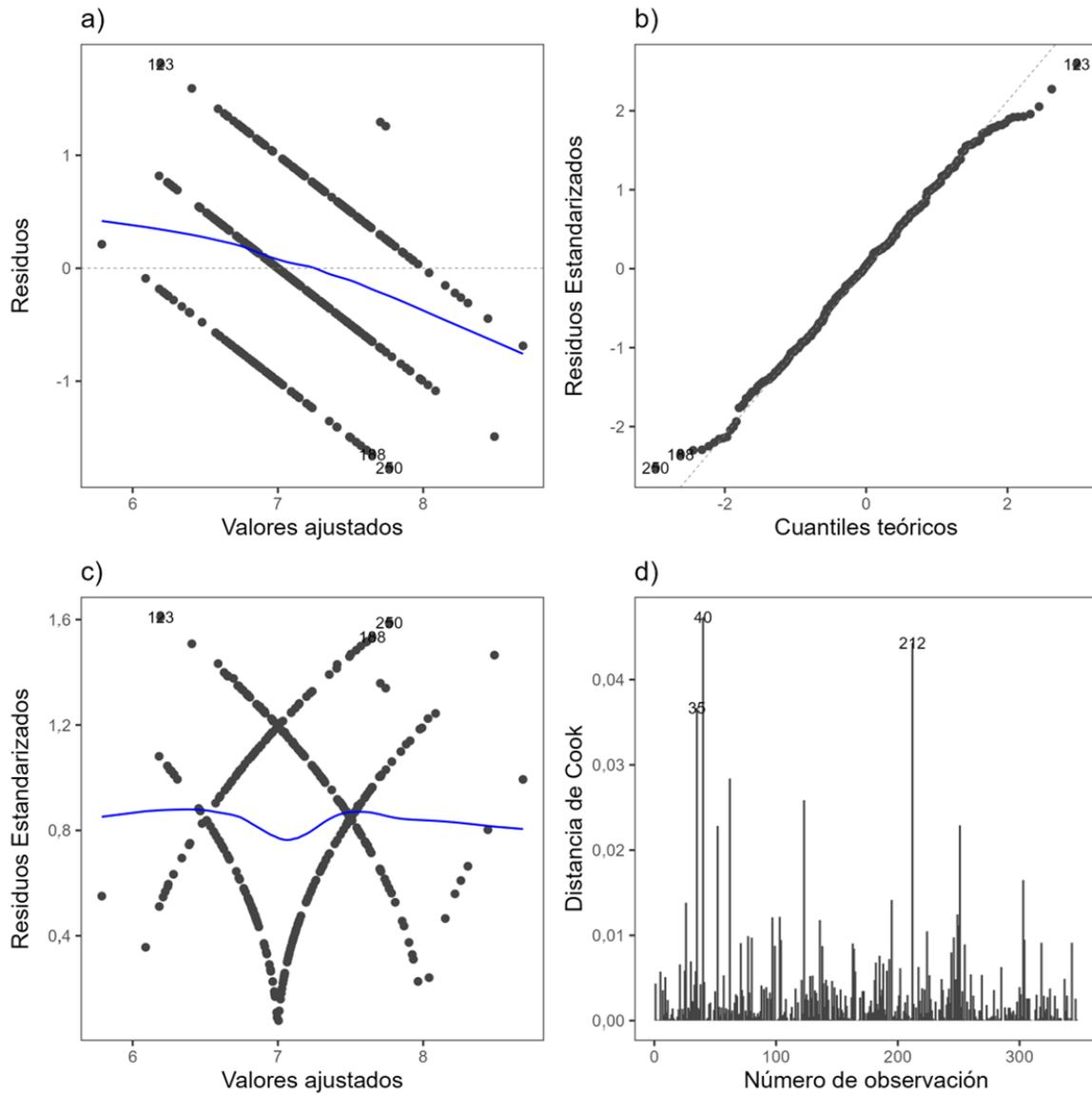


Figura 3. Validación de supuestos del modelo para número de manos con variables significativas (mod2_manos) R^2 (0,99). a) Linealidad. b) Normalidad. c) Homocedasticidad. d) Puntos atípicos.

Figure 3. Validation of model assumptions for number of hands with significant variables (mod2_manos) R^2 (0.99). a) Linearity. b) Normality. c) Homoscedasticity. d) Outliers.

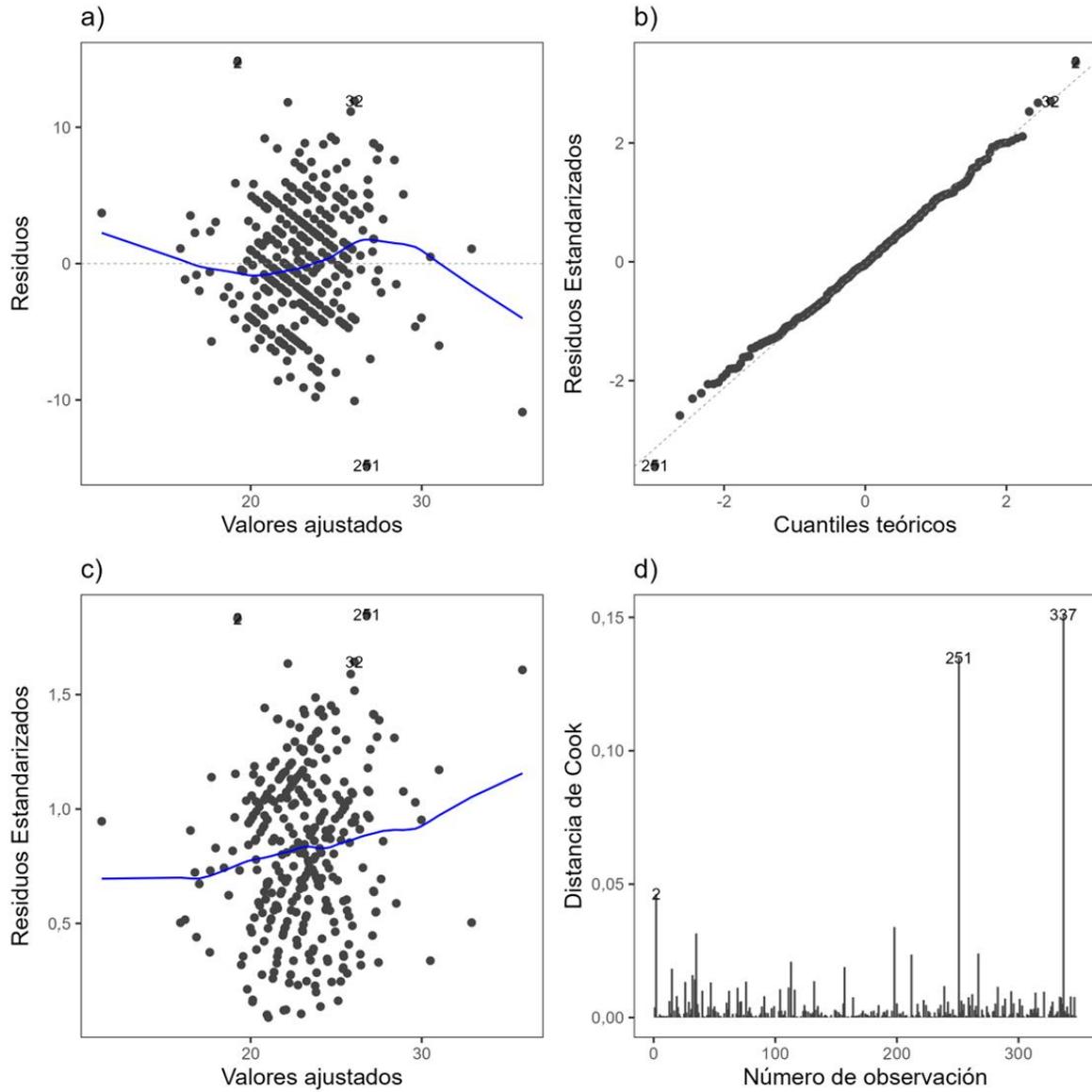


Figura 4. Validación de supuestos del modelo para peso con variables significativas (mod2_peso) R^2 (0,96). a) Linealidad. b) Normalidad. c) Homocedasticidad. d) Puntos atípicos.

Figure 4. Validation of model assumptions for weight with significant variables (mod2_peso) R^2 (0.96). a) Linearity. b) Normality. c) Homoscedasticity. d) Outliers.

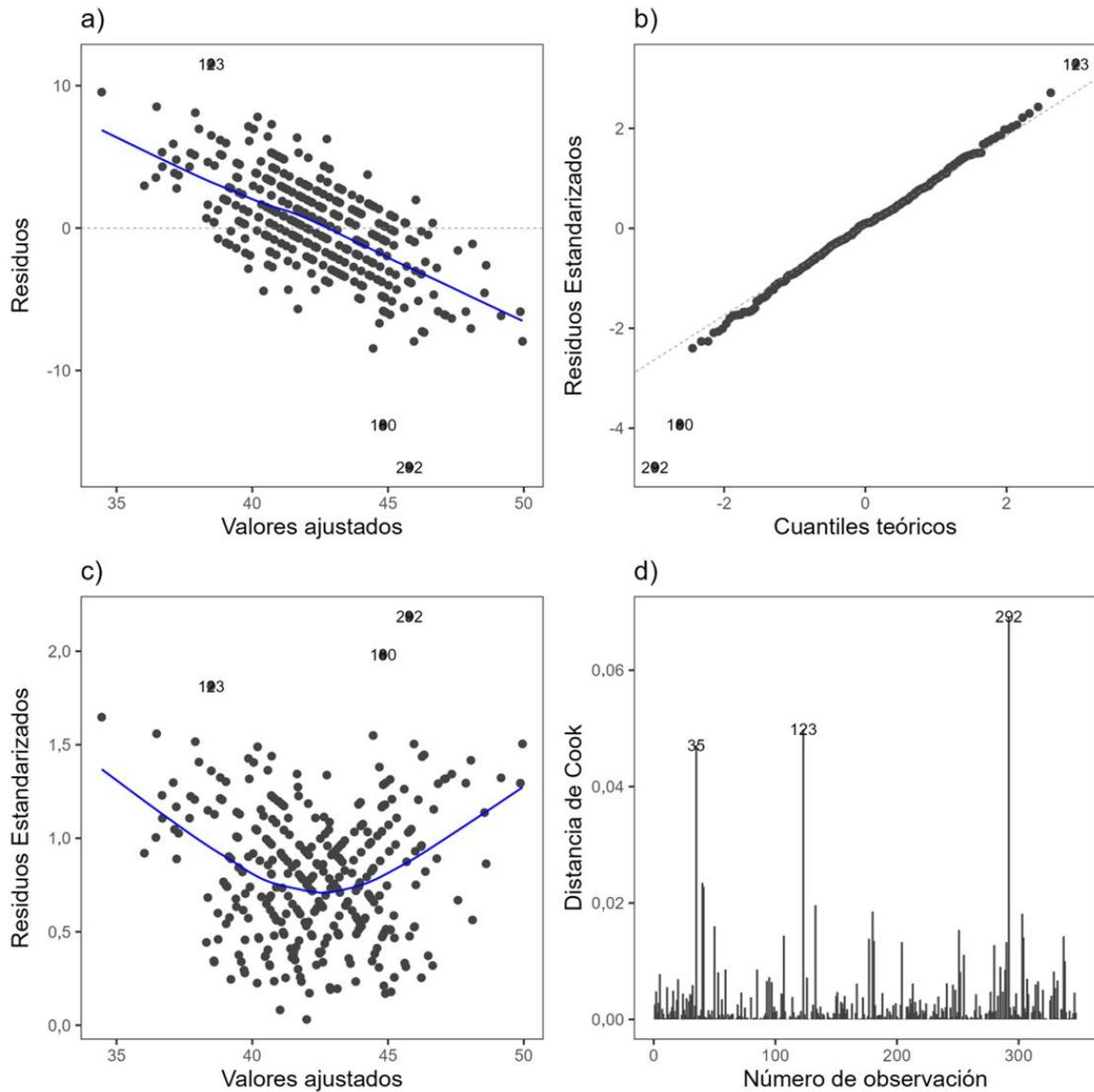


Figura 5. Validación de supuestos del modelo para calibre uno con variables significativas (mod2_cal1) R^2 (0,99). a) Linealidad. b) Normalidad. c) Homocedasticidad. d) Puntos atípicos.

Figure 5. Validation of model assumptions for caliber one with significant variables (mod2_cal1) R^2 (0.99). a) Linearity. b) Normality. c) Homoscedasticity. d) Outliers.

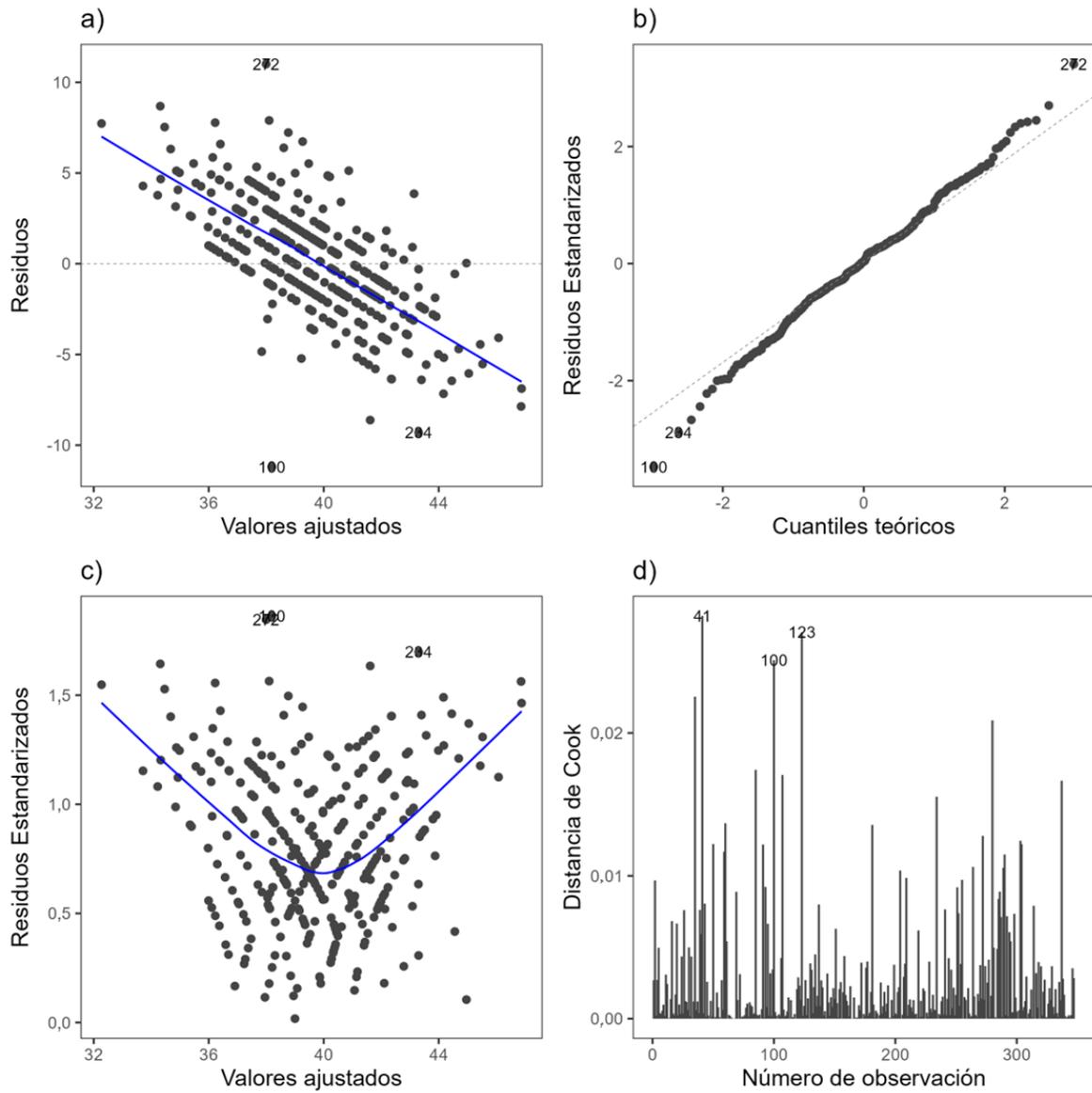


Figura 6. Validación de supuestos del modelo para calibre dos con variables significativas (mod2_cal2) R^2 (0,99). a) Linealidad. b) Normalidad. c) Homocedasticidad. d) Puntos atípicos.

Figure 6. Validation of model assumptions for caliper two with significant variables (mod2_cal2) R^2 (0.99). a) Linearity. b) Normality. c) Homoscedasticity. d) Outliers.

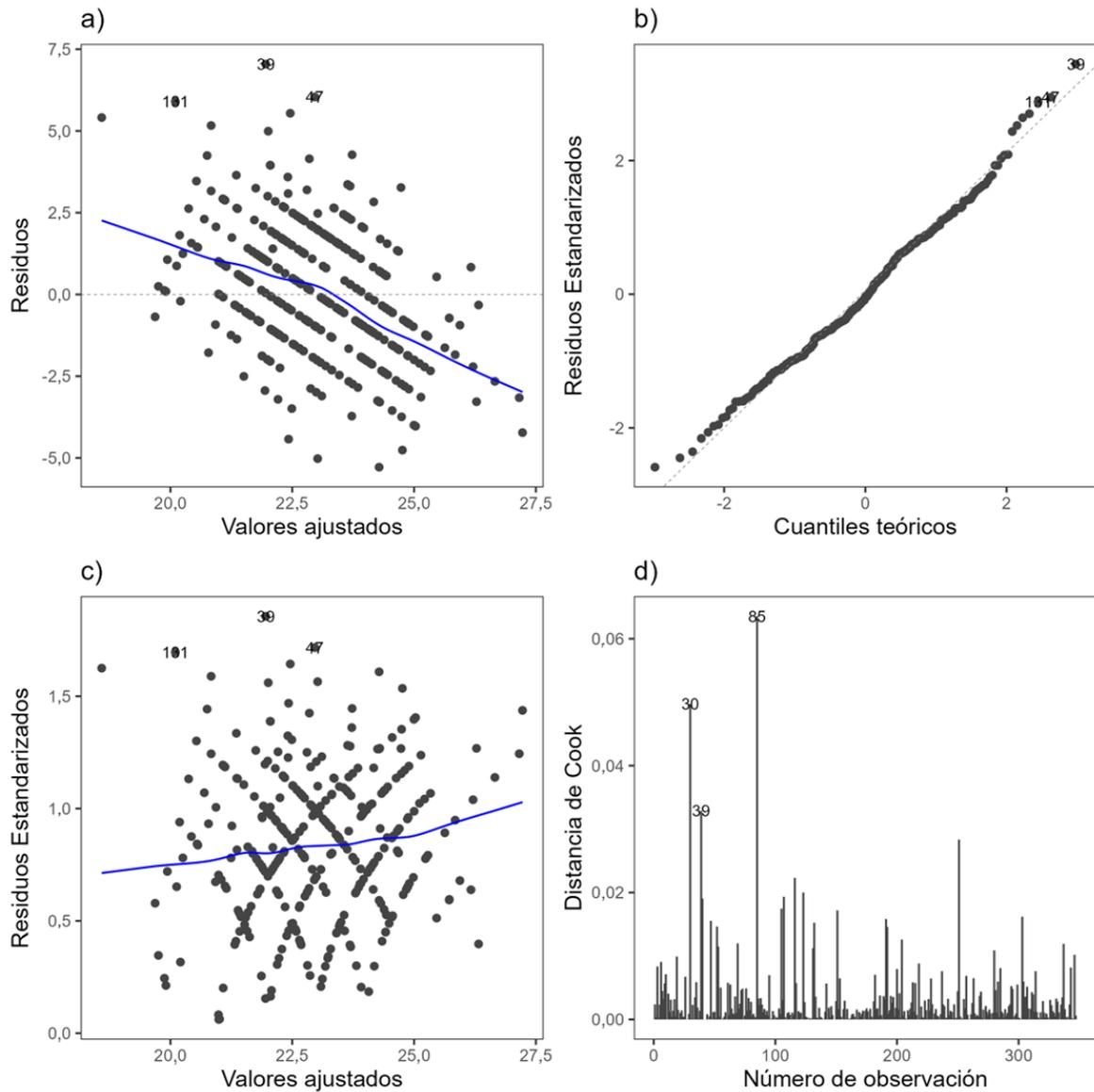


Figura 7. Validación de supuestos del modelo para largo uno con variables significativas (mod2_lar1) R^2 (0,99). a) Linealidad. b) Normalidad. c) Homocedasticidad. d) Puntos atípicos.

Figure 7. Validation of model assumptions for long one with significant variables (mod2_lar1) R^2 (0,99). a) Linearity. b) Normality. c) Homoscedasticity. d) Outliers.

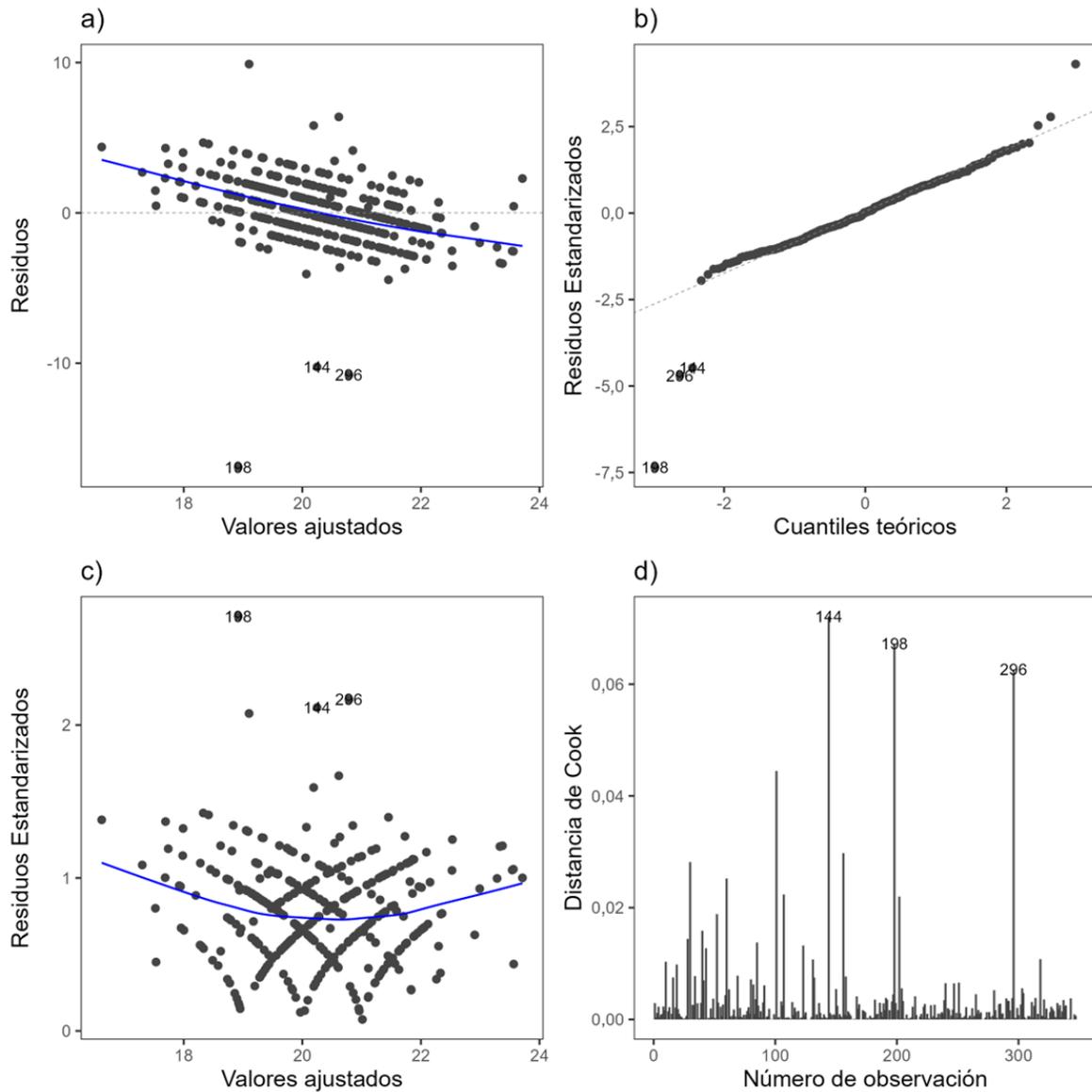


Figura 8. Validación de supuestos del modelo para largo dos con variables significativas (mod2_lar2) R^2 (0,98). a) Linealidad. b) Normalidad. c) Homocedasticidad. d) Puntos atípicos.

Figure 8. Validation of model assumptions for long two with significant variables (mod2_lar2) R^2 (0.98). a) Linearity. b) Normality. c) Homoscedasticity. d) Outliers.

Discusión

Selección de plantas a floración

Se estimó un porcentaje de muestra superior al mínimo indicado por la expresión matemática para definir el tamaño muestral con población finita. Esto considerando que frutos pequeños o con menos de seis manos deben ser eliminados a través del proceso conocido como “debunching” o eliminación temprana del racimo. Lo anterior se realiza para evitar afectación directa a la productividad, costos de producción y principalmente, impulsar el desarrollo del hijo de sucesión con las reservas del pseudotallo una vez que la planta madre no ha expresado los resultados productivos deseados (Bolívar *et al.* 2013).

La cantidad de manos retenidas en el racimo está determinada por la intensidad del desmane definido con base en los requerimientos de calidad de la finca para esa área en particular. La intensidad de este se define en función de la “mano de transición” o “mano falsa”, a partir de la cual se eliminan las manos que garanticen a la cosecha el máximo aprovechamiento (Carrion Gómez 2014). Sin embargo, si el racimo no cumple con los estándares predefinidos posterior al desmane, se realiza su eliminación, razón por la cual se redujo un 9,5% de las 400 unidades productivas estudiadas.

El volcamiento de una planta de banano observado en esta investigación puede atribuirse a condiciones climáticas extremas, como los fuertes vientos y las lluvias prolongadas que saturan los suelos, reduciendo la firmeza del anclaje de las plantas. Aunque el clon Gran Enano es conocido por su resistencia al volcamiento debido a su sistema radical robusto y su menor altura, en este caso particular, factores como el peso del racimo y el agua acumulada, combinados con una posible deficiencia en la práctica de apuntalamiento, pudieron haber contribuido a la caída de la planta (Vargas Céspedes *et al.* 2017). No obstante, dado que se reportó un solo caso, se reconoce que tasas más severas de volcamiento podrían manifestarse en condiciones diferentes o con otros cultivares.

La falta de normalidad observada en la distribución de los datos referente al número de hojas de la planta madre y del hijo de sucesión puede estar relacionado con la influencia generada por el uso de variables discretas en la investigación. Según Núñez-Colín (2018), en evaluaciones realizadas con base en variables discretas, es difícil encontrar normalidad, especialmente cuando se dan análisis de varianzas paramétricos como el ejecutado en este caso. Igualmente, Herrera Villafranca *et al.* (2012) mencionan que, a pesar del ajuste realizado en los datos, no se cumplió con el supuesto de normalidad en la variable número de hojas por tallos, lo que permite resaltar la necesidad de variables que cumplan determinados requisitos paramétricos en investigaciones aplicadas en las ciencias agropecuarias.

Correlación entre variables biométricas

La correlación entre la altura de la planta madre y el peso del racimo, encontrada en esta investigación, concuerda con la realizada por Rodrigues Soares *et al.* (2012) sobre la correlación entre los caracteres morfológicos y el peso estimado del racimo del híbrido tetraploide de banano YB42-21 (AAAB). No obstante, también se observó una correlación significativa entre el número de hojas y el peso del racimo, lo que difiere a lo encontrado en esta investigación, una vez que la correlación entre estas variables fue nula. Asimismo, dichos autores no encontraron una correlación entre la circunferencia del pseudotallo de la planta madre y el peso del racimo, resultado que también difiere de lo determinado en la presente investigación.

Rodrigues Donato *et al.* (2006), en su investigación, encontraron para el cultivar Gran Enano en el segundo ciclo de producción correlaciones positivas y significativas entre el peso del racimo y las variables perímetro del pseudotallo (0,84) y número de hojas observadas (0,89). La correlación encontrada entre el peso del racimo y la altura de la planta madre no fue significativa (0,31). Todas estas variables vegetativas mencionadas fueron observadas durante la etapa de floración del banano, y se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para su evaluación. No obstante, en el primer ciclo de producción, estas correlaciones fueron en su gran mayoría no significativas y positivas para los 13 genotipos evaluados.

Nyombi *et al.* (2009), en su investigación sobre las relaciones alométricas del plátano de las tierras altas de África Oriental, evaluaron distintas etapas fenológicas del crecimiento, la comprensión de la fisiología y la predicción del rendimiento del cultivo. Encontraron que al considerar múltiples etapas del ciclo vegetativo la circunferencia medida en la base de las plantas evaluadas resultó ser una variable explicativa más significativa que la altura. En consecuencia, se concluyó que la circunferencia es una variable importante para determinar el tamaño de la inflorescencia en el momento de la floración. Esto implica que las estrategias de manejo agronómico, como la fertilización, deben enfocarse en aumentar la circunferencia para optimizar el rendimiento del cultivo. Las correlaciones significativas encontradas en el presente estudio entre las variables vegetativas se asimilan a lo observado en el ajuste del modelo SIMBA-POP, desarrollado para simular floración en una plantación de banano. Este modelo mejoró significativamente cuando se agruparon las plantas por rangos de altura y, especialmente, por número de hojas de los hijos de sucesión al momento de la floración de la planta madre (Montero *et al.* 2016).

Esto indica que, aunque las variables vegetativas del hijo de sucesión se correlacionaron con una cantidad menor de variables de cosecha (cinco correlaciones significativas), en comparación con las variables de la planta madre (nueve correlaciones significativas), es fundamental considerarlas en el planteamiento de modelos de predicción en el cultivo de banano.

La importancia que tiene la planta madre dentro de la unidad productiva del cultivo se debe a que es un sistema consecutivo, ya que existe una influencia del pseudotallo de la planta madre cosechada sobre el hijo de sucesión (Rodríguez *et al.* 2006). Esto se debe a la disponibilidad de reservas y al agua que obtiene el hijo a partir de la cosecha de la planta madre. En la investigación realizada por Daniells y O'Farrel (1987), se indica que el efecto de la altura de corte del pseudotallo progenitor sobre el rendimiento es de aproximadamente 4,6 kg de aumento en el peso del racimo para el siguiente ciclo con una reducción del tiempo de duración del ciclo de hasta 18 días.

Las correlaciones observadas entre las variables de cosecha en el presente estudio concuerdan con hallazgos previos en la literatura. Por ejemplo, en la investigación de Rodrigues Donato *et al.* (2006), quienes concluyeron que la mayoría de las asociaciones significativas y positivas observadas para las características del racimo fueron entre variables vegetativas de la planta madre evaluadas el día de cosecha y variables morfológicas del racimo para los 13 genotipos de banano estudiados, entre ellos el cultivar Gran Enano.

Análisis de regresión entre las variables biométricas a floración y a cosecha

La similitud observada entre el R^2 del primer y segundo modelo planteado para cada variable dependiente permite inferir que la magnitud del efecto, dirección y significancia, tanto en el modelo uno como en el dos, está asociada a las variables significativas reflejadas para cada variable dependiente estudiada. Por tanto, es relevante identificar las variables significativas que se repiten en todos los modelos, que en este caso corresponde a las variables vegetativas denominadas (CircunferenciaM) y (AlturaM), asociadas directamente a la planta madre. Tal como ha sido mencionado, Rodrigues Donato *et al.* (2006) y Rodrigues Soares *et al.* (2012) encontraron una correlación significativa según cada variable mencionada respectivamente.

Dens *et al.* (2008), en su investigación sobre la influencia en crecimiento y peso del racimo de los cultivos retoño en diferentes cultivares de banano, encontraron que el pseudotallo de la planta madre es una fuente de asimilados importante, tanto para el fruto en desarrollo como para el hijo de sucesión.

Sin embargo, el fruto está totalmente influenciado por la disponibilidad de asimilados del pseudotallo y la etapa reproductiva de la planta madre, pues si los asimilados son limitados, el racimo en formación tiene prioridad frente a los retoños. No obstante, cuando son más abundantes, el racimo como sumidero también crece, aunque la planta madre igualmente tiene la capacidad de enviar más carbono al hijo de sucesión.

Martínez Acosta y Cayón Salinas (2011), en su investigación sobre la dinámica del crecimiento y desarrollo del banano (*Musa* AAA Simmonds cvs. Gran Enano y Valery), encontraron que ambos cultivares se ajustan a la típica curva sigmoidea de crecimiento. Aunque, en el caso específico del Gran Enano, este acumula una mayor cantidad de materia seca hasta la zona de diferenciación del meristemo, lo cual responde a una distribución y acumulación diferencial de asimilados entre los órganos.

Stover y Buddenhagen (1986), en su estudio sobre la mejora genética del banano, poliploidía, resistencia a enfermedades y productividad, identificaron que existe una translocación de fotoasimilados y de reservas amiláceas e hídricas que se da de modo gradual desde las fases de cormo y pseudotallo hasta las etapas de floración y posterior fruto en formación. Esto explica la reducción de materia seca en los diferentes órganos de la planta, la cual tiene un comportamiento distinto en cantidad y tiempo para diversos cultivares evaluados. Todo lo anterior reitera la significancia de la circunferencia y altura de la planta madre en la investigación presentada, además, la importancia de la composición genética de cada variedad en el cultivo de banano.

Análisis y validación de supuestos

La relación entre el hijo de sucesión y la productividad de la planta madre se evidenció en el modelo mod2_peso, el cual presentó el mayor cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Este comportamiento es consistente con la investigación de Swennen y De Langhe (1985), quienes concluyeron que un rendimiento elevado en plátano (*Musa* cv. AAB) está relacionado con un crecimiento inicial del brote plantado. Específicamente, los pseudotallos principales de crecimiento rápido están acompañados por retoños con el mismo patrón de crecimiento, estableciendo una relación proporcional entre la planta madre y los hijos de sucesión, una característica propia de la familia Musaceae.

Modelo de regresión obtenido

A pesar de que Rodrigues Soares *et al.* (2012) encontraron una correlación significativa entre la variable vegetativa asociada a altura de la planta madre, medida a floración y la variable de cosecha (peso del racimo), el modelo de regresión obtenido por los autores no incluyó esta variable en la ecuación. Este modelo obtenido por los autores anteriormente se detalla en la siguiente ecuación:

$$BW = 5,249 + 0,11 NLH + 0,066 NFB + 0,046 FW + 0,183 FL + 2,039 RW - 0,011 LS$$

Donde:

BW = peso del racimo

NLH = número de hojas a cosecha

NFB = número de manos por racimo

FW = peso del dedo central de la segunda mano del racimo

FL= longitud del dedo central de la segunda mano del racimo

RW = peso del raquis

LS = longitud del pedúnculo

Este modelo presentó un $R^2 = 0,7$, en el cual la única variable vegetativa utilizada fue el número de hojas a cosecha (con un comportamiento de variable discreta). Las demás variables incluidas en la ecuación solo pueden evaluarse cuando el racimo está listo para ser cosechado. En dicho estudio, se concluyó que las variables vegetativas no son buenos indicadores del peso del racimo.

En la presente investigación, se estableció que las variables vegetativas medidas a la floración son importantes para la construcción de modelos de predicción, basándose en las correlaciones encontradas con respecto a las variables de cosecha y al rol que juegan sobre el racimo. En este caso, la ecuación encontrada permite predecir el peso del racimo utilizando variables que se pueden medir 11 semanas antes de la cosecha, en condiciones similares a las de este estudio.

El RMSE obtenido en la presente investigación fue de 4,41 kg, un valor relativamente alto que indica una menor precisión en la estimación del modelo. No obstante, en la investigación de Soto-Bravo y González-Lutz (2019) sobre métodos estadísticos en cultivos hortícolas, una simulación para el rendimiento del fruto con intercepto 0, RMSE bajo y R^2 alto mostró límites de confianza cercanos, lo que denota precisión. Sin embargo, en el mismo estudio, la simulación de la materia seca, a pesar de tener un RMSE bajo y R^2 alto, se evidenciaron discrepancias crecientes entre lo simulado y lo observado a medida que aumentaban los valores, cuestionando así su validez.

En el contexto de un análisis de regresión destinado a la predicción en agricultura, es crucial evaluar diversos estadísticos para determinar la efectividad del modelo. Además, factores como las características de la variable predictora, el valor observado, el tamaño de la población, el tipo de cultivo y las condiciones climáticas influyen significativamente en la precisión del modelo. Por lo tanto, es importante no solo considerar los estadísticos aislados, sino también analizar el comportamiento del modelo en relación con los datos observados y su contexto específico.

Conclusiones

Las variables de la planta madre fueron las que se correlacionaron significativamente con más variables de cosecha, especialmente, la circunferencia y altura del pseudotallo, únicas dos variables continuas medidas en la planta madre.

Es importante tener en cuenta las variables vegetativas del hijo de sucesión en el planteamiento de modelos de predicción en el cultivo de banano, debido al rol que cumple toda la unidad productiva en el desarrollo de la inflorescencia para el fruto en crecimiento y las generaciones futuras.

El modelo de regresión que mejor expresa la producción del banano es el modelo dos del peso, según validación de supuestos y R^2 , el cual no cambió tras la ejecución del segundo modelo. Por ende, se confirmó que la magnitud del efecto y la dirección fue determinada por las variables significativas representadas en este.

El R^2 no debe ser el único indicador de aprobación en modelos de regresión lineal múltiple, por lo tanto, se debe enfatizar que la validación de supuestos, el RMSE y contexto específico para aprobar o no el uso de una ecuación para predicción de cosecha en el cultivo de banano.

Agradecimiento

Las autoras de este artículo desean expresar un profundo agradecimiento a la Fundación Mastercard por su generoso apoyo financiero, el cual fue fundamental para la realización de esta investigación en el marco de la obtención del título de Ingenieras Agrónomas. Asimismo, agradecen a la Universidad EARTH por ser la institución que proporcionó la base de conocimientos técnicos y permitió contribuir al avance científico mediante este proyecto. También, agradecen a los funcionarios y la facultad en general por su apoyo, en especial el profesor Oswaldo Navarrete Carreño, quién fue crucial para el óptimo desarrollo de la investigación.

Expresan su sincero agradecimiento y reconocimiento a los asesores y profesores, cuya orientación experta, paciencia y colaboración constante fueron fundamentales para dar forma a este proyecto y llevarlo a cabo con éxito. Específicamente, a Steven Brenes Prendas, profesor de la Universidad EARTH y Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Protección de Cultivos; a Diego Pérez Ortiz, Coordinador de Innovación Agrícola en Fyffes e Ingeniero Agrónomo; y a Alfonso Vargas Calvo, Consultor e Ingeniero Agrónomo.

Por último, agradecen a Adrián Jiménez Zúñiga, Gerente de Cultivos Comerciales de la Universidad EARTH, quien facilitó la realización de la investigación en las fincas de producción de banano comercial de la Universidad. Junto con su equipo de trabajo, brindaron el espacio experimental y los recursos necesarios para llevar a cabo la investigación de manera efectiva.

Literatura citada

Arias, F; Mata, R; Alvarado, A; Serrano, E; Laguna, J. 2010. Caracterización química y clasificación taxonómica de algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* 34(2):177-195. Consultado 13 oct. 2023. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/3631/3536>

Bóbeda, GRR. 2018. Modelo de predicción de volúmenes de producción y distribución de tamaño de frutos a cosecha en Mandarino “Tangor Murcott” (en línea). Tesis Ph. D. Universidad de Oviedo. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. Consultado 24 feb. 2023. Disponible en <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/66425>

Bolívar, K; Domínguez, JÁ; Arroyo, AT; Perret, J; Soto, M. 2013. Análisis georreferenciado de la distribución del número de manos por racimo en un área bananera (en línea). *Agronomía Costarricense* 37(2):105-113. Consultado 02 ago. 2023. Disponible en https://www.mag.go.cr/rev_agr/v37n02_105.pdf

Buenaño Cordero, JC; De La Cruz Cedeño, C; Zurita Herrera, G. 2011. Verificación de calidad de modelos en regresión lineal software estadístico de regresión ERLA (en línea). Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Repositorio ESPOL. Consultado 27 set. 2023. Disponible en https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/17152/1/RESUMEN_CICYT_Tesina_Buenaño_DeLaCruz%20_ICM.pdf

Carrión Gómez, E. 2014. Diseño de un complejo turístico agrícola situado en la ciudad de Quevedo – Los Ríos (en línea). Tesis Lic. Ecuador, Universidad de Guayaquil, Repositorio de Universidad de Guayaquil. s. p.

Chacín, F; Ascanio, M; Hernández, A; García, J; Cobo, M; Ascanio, A. 2005. Predicción de cosechas en plátano (*Musa AAB Hartón'*) mediante dos modelos de regresión (Forward y Stepwise). Revista de la Facultad de Agronomía 31(1):21-35.

Daniells, JW; O'Farrell, PJ. 1987. Efecto de la altura de corte del pseudotallo principal sobre el rendimiento y el tiempo de producción del siguiente retoño en banano. *Scientia Horticulturae* 31(1-2):89-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(87\)90110-5](https://doi.org/10.1016/0304-4238(87)90110-5)

Dens, KR; Romero, RA; Swennen, R; Turner, DW. 2008. La eliminación del racimo, las hojas o el pseudotallo, sola o combinada, influye en el crecimiento y el peso del racimo de los cultivos de retoño en dos cultivares de banano. *Horticultural Science & Biotechnology* 83(1):113-119. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14620316.2008.11512355>

Estrada Macalupú, C. 2022. Modelos matemáticos para la predicción de trips de la mancha roja en plantaciones de banano orgánico a partir de variables atmosféricas - Buenos Aires, Morropón (en línea). Tesis de Ingeniería, Universidad de Piura. Repositorio de Universidad de Piura. Consultado 26 feb. 2023. Disponible en https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/5571/IME_2206.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

FAO. 2020. Perspectivas a mediano plazo: perspectivas para la producción y el comercio mundial de bananos y frutas tropicales 2019-2028 (en línea). Consultado 27 feb. 2023. Disponible en <https://www.fao.org/publications/card/es/c/CA7568ES/>

FAO. 2022. Banano análisis del mercado 2021 (en línea). Consultado 27 feb. 2023. Disponible en <https://www.fao.org/3/cc1610es/cc1610es.pdf>

Ferre Jaén, ME. 2019. FEIR 40: Modelos de Regresión (en línea). Consultado 02 jun. 2023. Disponible en <https://gauss.inf.um.es/feir/40/>

Fitzgerald, CE. 2015. Una corrección para los índices de ajuste del modelado de ecuaciones estructurales en caso de falta: adaptación del error cuadrático medio de aproximación a las condiciones de datos faltantes. Tesis Lic. USA, Universidad de Virginia. Harvard Dataverse. V1.DOI: <https://doi.org/10.7910/DVN/28657/7WMTDR>

González, OR; Bacallao, RF; Naualles, MV. 2018. Aplicaciones de la modelación matemática y la simulación de cultivos agrícolas en Cuba (en línea). Cultivos Tropicales 39(1):121-126. Consultado 27 feb. 2023. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000100018

Google EARTH. 2020. [Universidad EARTH] (en línea). Consultado 27 feb. 2023. Disponible en <https://earth.google.com/web/@10.2149482,-83.5915285,36.90018027a,1037.81962701d,35y,287.999712h,45t,0r/data=CkIaQBI6CiUweDhmYTBINGVIYmUxMTE3Mjc6MHhhNDZjZTU3OGEyOWIyNTM3KhFVbml2ZXJzaWRhZCBFQVJUSBgCIAE>

Hernández Córdova, N; Soto Carreño, F; Florido Bacallao, R; Plana Llenera, R; Caballero Núñez, A; Maqueira López, LA; Cid Lazo, G; López Ceijas, T; Chaterlan Durruty, Y; García López, A; Solano Ojeda, O; Vásquez Montenegro, R; Otero Gómez, L; Vantour Causse, A. 2015. Utilización de un modelo de simulación para la predicción del comportamiento de algunos cereales en las condiciones de Cuba (en línea). Cultivos Tropicales 37(1):78-84. Consultado 24 feb. 2023. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/1932/193245041011/html/>

Herrera Villafranca, M; Guerra Bustillos, CW; Sarduy García, L; García Hernández, Y; Martínez, CE. 2012. Diferentes métodos estadísticos para el análisis de variables discretas. Una aplicación en las ciencias agrícolas y técnicas (en línea). Revista Ciencia Técnicas Agropecuarias 21(1):58-62. Consultado 18 set. 2023. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21n1/rcta11112.pdf>

Kim, B. 2015. Understanding diagnostic plots for linear regression analysis. StatLab de la Biblioteca UVA (en línea). Consultado 02 jun. 2023. Disponible en <https://library.virginia.edu/data/articles/diagnostic-plots>.

López Guerrero, A. 2017. Análisis de la cadena de producción y comercialización del banano en Ecuador-Período 2013-2015. Superintendencia de Control del Poder de Mercado. Ecuador. s. p.

Martínez Acosta, AM; Cayón Salinas, DG. 2011. Dinámica del crecimiento y desarrollo del banano (*Musa* AAA Simmonds cvs. Gran Enano y Valery) (en línea). Revista Facultad Nacional de Agronomía – Medellín 64(2):6055-6064. Consultado 25 set. 2023. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179922664003>

Martínez Solórzano, GE; Rey Brina, JC. 2021. Bananos (*Musa* AAA): importancia, producción y comercio en tiempos de Covid-19 (en línea). Agronomía Mesoamericana 32(3):1034-1046. Consultado 26 feb. 2023. Disponible en <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v32n3/2215-3608-am-32-03-01034.pdf>

Montero, H; Tixier, P; González, M; Rodríguez Montero, W; Guzmán Álvarez, JA. 2016. Modelo de pronóstico de la producción (SIMBA-POP) del cultivo de banano basado en su fenología [Presentación]. VI Congreso Internacional sobre banano CORBANA y XXI Reunión Internacional ACORBAT, Miami, Estados Unidos. Consultado 24 feb. 2023. Disponible en <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/72985>

Núñez-Colín, CA. 2018. Análisis de varianza no paramétrica: un punto de vista a favor para utilizarla. Acta Agrícola y Pecuaria 4(3):69-79. DOI: <https://doi.org/10.30973/aap/2018.4.3/1>

Nyombi, K; van Asten, PJA; Leffelaar, PA; Corbeels, M; Kaizzi, CK; Giller. 2009. Relaciones alométricas de crecimiento del plátano de las tierras altas de África Oriental (*Musa* AAA-EAHB) cv. Kisansa y Mbwazirume. Asociación de Biólogos Aplicados 155(1):403-418. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1744-7348.2009.00353.x>

Padilla Arroyo, OD. 2022. Valoración de datos biométricos y calidad del racimo, bajo diferentes ciclos de desmache en plantas de banano (*Musa* AAA) en el municipio de Carepa, Antioquia (en línea). Tesis de Ingeniería, Universidad de Córdoba. Repositorio Universidad de Córdoba. Consultado 27 feb. 2023. Disponible en <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/6152/PadillaArroyoOscar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pramanik, S; Patra, SK; Ghosh, S. 2024. La irrigación deficitaria mediada por goteo y la estrategia de gestión de la fertirrigación subóptima pueden aumentar el rendimiento, la disponibilidad de nutrientes del suelo, la utilización de las plantas y el carbono orgánico del suelo en la plantación de banano. *J Soil Sci Plant Nutr.* 24:3843-3860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01804-y>

R Core Team. 2022. RStudio (4.2.2) (en línea). Consultado 02 jun. 2023. Disponible en <https://www.r-project.org/>

Robinson, JC; Galán Saúco, V. 2010. Bananas and plantains (2 ed.). CAB International. s. p.

Rodrigues Donato, SL; de Oliveira e Silva, S; Lucca Filho, AO; Bezerra Lima, M; Domingues, H; da Silva Alves, J. 2006. Correlaciones entre los caracteres de la planta y de la cabeza en el plátano (*Musa* spp.) (en línea). *Ciência e Agrotecnologia* 30(1):21-30. Consultado 08 set. 2023. Disponible en <https://www.scielo.br/j/cagro/a/yqSt5B84PdV3QXxMkNfkFws/abstract/?lang=pt>

Rodrigues Soares, JD; Pasqual, M; Almendagna Rodrigues, F; Soares Lacerda, W; Rodrigues Donato, SL; de Oliveira e Silva, S; Arantes Paixão, C. 2012. Correlación entre caracteres morfológicos y peso estimado del racimo del cultivar Tropical banana. *African Journal of Biotechnology* 11(47):10682-10687. Consultado 04 set. 2023. Disponible en <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/128601/118157>

Rodríguez, C; Cayón, G; Mira, JJ. 2006. Influencia del pseudotallo de la planta madre cosechada sobre el crecimiento y producción del hijo de sucesión en banano (*Musa* AAA Simmonds). *Agronomía Colombiana* 24(2):274-279. Consultado 08 set. 2023. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180316239009.pdf>

Soto, M. 2011. Situación y avances tecnológicos en la producción bananera mundial. *Revista Brasileira de Fruticultura* 33(1):13-28. Consultado 26 feb. 2023. Disponible en <https://www.scielo.br/j/rbf/a/bCj5JghTRGf6xDjHsRqyZ6b/?lang=es&format=pdf>

Soto-Bravo, F; González-Lutz, MI. 2019. Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana* 30(2):517-534. DOI: 10.15517/am.v30i2.33839

Stover, RH; Buddenhagen, IW. 1986. Mejora genética del banano: poliploidía, resistencia a enfermedades y productividad (en línea). *Fruits* 41(3):175-195. Consultado 25 set. 2023. Disponible en <https://revues.cirad.fr/index.php/fruits/article/view/34918/34014>

Swennen, R; De Langhe, E. 1985. Parámetros de crecimiento y rendimiento del plátano (*Musa cv. AAB*). *Annals of Botany* 56(2):197-204. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087003>

Toro Trujillo, AM; Arteaga Ramírez, R; Vázquez Peña, MA; Ibáñez Castillo, LA. 2016. Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá antioqueño, Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5(6):105-122 Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353549830007.pdf>

Torres Castillo, R. 2021. Importancia de las ciencias matemáticas en la agricultura. *Green World Journal* 4(6):1-6. DOI: <https://doi.org/10.53313/gwj42008>

Universidad EARTH. 2023. Base de datos climáticos [documento de Excel]. s.p.

Vargas Calvo, A. 2012. Grosor del fruto de la última y segunda mano como criterio de cosecha en banano (en línea). *Agronomía Mesoamericana* 23(1):41-46. Consultado 08 ago. 2024. Disponible en <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v23n1/a05v23n1.pdf>

Vargas Céspedes, A; Watler, W; Morales, M; Vignola, R. 2017. Ficha técnica: prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica (en línea). Consultado 26 feb. 2023. Disponible en <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8205.pdf>

Villareal, JV; Sentis, IP; Martínez, LA; Perez, JV; Rosales, F; Pocasangre, L. 2013. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá (en línea). *Agronomía Mesoamericana* 24(2):301-315. Consultado 27 feb. 2023. Disponible en https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212013000200007

Zakaria, MAT; Sahara, SS; Ramlan, MF; Jaafar, HZ; Baghdadi, A; Mohd Din, SN. 2018. Cambios morfológicos y fisiológicos de la banana (*Musa acuminata* cv. Berangan) al Brassinolide en la fase de vivero (en línea). *Journal of Tropical Plant Physiology* 10:36-45. Consultado 08 ago. 2024. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/326331102>

