

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias de la Vida

Diseño de un plan de fertilización para el cultivo de cacao basado en el
pronóstico de cosecha y extracción de nutrientes

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Agrícola y Biológico

Presentado por:

Marena Nicole Arias Brito

Paola Elizabeth Loor Moreira

Guayaquil - Ecuador

2024

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico aquellos cuyos conocimientos y apoyo han contribuido con este logro académico. A mi familia y amigos que siempre me han brindado su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Esto solo es el comienzo de algo excepcional. A Capu por siempre acompañarme en cada desvelo y calmarme en los días de mayor presión.

Paola Loor

El presente proyecto y esfuerzo es gracias a Dios, por su guía durante todos estos años.

A mi familia, mi madre Karina Brito, por ser mi apoyo durante este trayecto y confiar en mis conocimientos, a mi hermana Ximena Arias por ser mi compañera de vida y escucharme todos los días sobre mis aprendizajes y vivencias universitarias.

A mi pareja Elvis Correa, este logro también es suyo, por ser parte de todos los días de su ejecución a la distancia escuchándome y siempre motivándome a esforzarme y ser la mejor durante mi carrera y en este trabajo. Tu ayuda fue fundamental para mi desarrollo académico tanto como el desarrollo de este proyecto, mi motivación más grande tú y nuestro futuro. Gracias por siempre estar para mí y por regalarme mi felicidad más grande que es mi Titi.

Marena Arias

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al
Laboratorio de Suelos y Nutrición
Vegetal de la ESPOL por su compromiso,
orientación y apoyo durante el desarrollo
de esta investigación.

A la decana María Isabel Jiménez PhD. y
a nuestros tutores, Eduardo Chávez PhD.
y Ronald León MSc., por haber confiado
en nosotras, en nuestro trabajo y
capacidad para la realización de este
proyecto.

A nuestras amigas y compañeras por su
ayuda en los momentos más difíciles.

Marena Arias y Paola Loor

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Marena Arias Brito y Paola Loor Moreira y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Marena Arias Brito

Marena Nicole Arias

Brito

Paola Loor M.

Paola Elizabeth

Loor Moreira

Evaluadores

María Isabel Jiménez, PhD.

Profesor de Materia

Eduardo Francisco Chávez, PhD.

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto diseña un plan de fertilización y un modelo probabilístico para pronosticar el rendimiento del cultivo de cacao del clon ETT 800, como herramienta para maximizar su nivel de productividad, además, de establecer una metodología aplicable para cualquier variedad de cacao. El estudio se realiza en la granja experimental agrícola de la ESPOL, en la provincia de Guayas, Ecuador. Se desarrolló un modelo de regresión lineal para estimar la producción total real basándose en datos reales y empíricos de rendimiento. El modelo mostró una fuerte asociación lineal entre estas variables, con un coeficiente de correlación de 0,963 y un R^2 de 0,927, además, estimó 50% más que los datos empíricos. También, se analizó la extracción de nutrientes de las almendras de cacao para calcular los requerimientos de fertilizantes. Las ratios de fertilizantes recomendados son 45.4-47 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, 10.37-10.66 kg ha⁻¹ año⁻¹ de P₂O₅, 25.18-26.11 kg ha⁻¹ año⁻¹ de K₂O y 5.38-5.50 kg ha⁻¹ año⁻¹ de MgO para producir entre 1 a 3 toneladas de cacao seco por hectárea, lo cual requiere una inversión de \$141 a \$437 por hectárea. En comparación con los costos del clon CCN-51, el clon ETT 800 se mantiene como una alternativa económicamente eficiente para los agricultores, respaldado por sus destacadas ventajas productivas.

Palabras Clave: Pronóstico de cosecha, cacao, modelo probabilístico, rendimiento, fertilización.

Abstract

The project designs a fertilization plan and a probabilistic model to forecast the yield of the ETT 800 cocoa clone, serving as a tool to maximize its productivity, and establishing a methodology applicable to any cocoa variety. The study takes place at the ESPOL experimental agricultural farm located in the Guayas province, Ecuador. A linear regression model was developed to estimate the actual total production based on real and empirical performance data. The model showed a strong linear association between these variables, with a correlation coefficient of 0.963 and an R^2 of 0.927. Additionally, it estimated 50% more than the empirical data. Nutrient extraction from cocoa almonds was also analyzed to calculate fertilizer requirements. The recommended fertilizer ratios are 45.4-47 kg ha⁻¹ year⁻¹ of N, 10.37-10.66 kg ha⁻¹ year⁻¹ of P₂O₅, 25.18-26.11 kg ha⁻¹ year⁻¹ of K₂O, and 5.38-5.50 kg ha⁻¹ year⁻¹ of MgO to produce between 1 to 3 tons of dry cocoa per hectare. This requires an investment of \$141 to \$437 per hectare. In comparison with the costs of the CCN 51 clone, the ETT 800 clone remains an economically efficient alternative for farmers, supported by its outstanding productivity advantages.

Keywords: Crop forecasting, cocoa, probabilistic model, yield, fertilization.

Contenido

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Abreviaturas.....	VI
Simbología	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	VIII
Capítulo 1.....	9
1. Introducción	9
1.1. Descripción del problema	10
1.2. Justificación del problema.....	11
1.3. Objetivos	12
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	12
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	12
1.4. Marco Teórico	13
1.4.1. <i>El cacao en el Ecuador</i>	13
1.4.2. <i>Floración y fructificación del cultivo de cacao</i>	13
1.4.3. <i>Factores de conversión e índices de rendimiento</i>	14
1.4.4. <i>Variedad EET-800 (Aroma Pichilingue)</i>	14
1.4.5. <i>Factores que disminuyen el rendimiento de las cacaoteras</i>	15
1.4.6. <i>Nutrición del cultivo de cacao</i>	16
1.4.6.1. <i>Costos asociados a la nutrición del cultivo de cacao</i>	18

1.4.7.	<i>Extracción de nutrientes de las almendras</i>	18
1.4.8.	<i>Pronóstico de cosecha</i>	19
1.4.9.	<i>Modelo productivo para el pronóstico de cosecha</i>	21
Capítulo 2	25
2.	Metodología	25
2.1.	Área de estudio	25
2.2.	Características del ensayo experimental	26
2.3.	Obtención de las muestras de mazorcas	26
2.4.	Registro de parámetros de las mazorcas	27
2.5.	Análisis químico de almendra	28
2.5.1.	<i>Preprocesamiento de almendras secas</i>	28
2.5.2.	<i>Digestión de las muestras</i>	28
2.5.3.	<i>Determinación de concentraciones</i>	29
2.5.4.	<i>Método Dumas</i>	29
2.6.	Análisis estadísticos de los parámetros de cosecha	29
2.7.	Modelo para el pronóstico de cosecha	31
2.8.	Diseño del plan de fertilización	32
2.9.	Costos	33
Capítulo 3	34
3.	Resultados y análisis	34
3.1.	Análisis estadístico de los parámetros de cosecha	34

3.1.1. <i>Producción Total</i>	35
3.1.2. <i>Número de almendras</i>	36
3.1.3. <i>Índice de mazorca</i>	37
3.2. Modelo para pronóstico de cosecha	38
3.3. Plan de fertilización	40
3.3.1. <i>Requerimiento de fertilizantes del clon EET 800</i>	42
3.4. Costos	43
Capítulo 4	45
4.1. Conclusiones y recomendaciones	45
4.1.1. <i>Conclusiones</i>	45
4.1.2. <i>Recomendaciones</i>	46
Referencias	47

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GEA	Granja Experimental Agrícola
FOB	Free on Board
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
BBCH	Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt und Chemische Industrie
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
EET	Estación Experimental Tropical
CCN-51	Colección Castro Naranjal
ASSS	Arriba Superior Summer Selecta
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
SUCROS	Simple and Universal Crop growth Simulator
IMPACT	International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
JMP	Java Memory Profiler
ROI	Retorno de la Inversión
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca

Simbología

kg ha ⁻¹	Kilogramo por hectárea
ton ha ⁻¹	Tonelada por hectárea
kg	Kilogramo
N	Nitrógeno
P ₂ O ₅	Pentóxido de difósforo
K ₂ O	Óxido de potasio
Mg	Magnesio
Zn	Zinc
B	Boro
Ca	Calcio
MN	Micronutrientes

Índice de figuras

Figura 1. Fenología floral y reproductivas del cultivo de cacao.....	13
Figura 2. Curva de absorción de nutrientes en el cultivo de cacao.....	17
Figura 3. Diagrama de la metodología.....	25
Figura 4. Zona de estudio	26
Figura 5. Esquema del fruto donde se indica la ubicación de los parámetros de longitud y circunferencia.....	27
Figura 6. Diagrama de flujo de pruebas estadísticas para evaluación de supuestos de normalidad y homogeneidad.....	31
Figura 7. Diagrama de caja de la producción total (kg/ha) por tratamiento de fertilización .	35
Figura 8. Gráfico de puntos de rangos de producción total de cacao seco (kg/ha) por tratamiento	36
Figura 9. Diagrama de caja del número de almendras por mazorca para cada tratamiento de fertilización	37
Figura 10. Índice de mazorca (IM) según el tratamiento de fertilización. Las barras representan el error estándar de las réplicas de los tratamientos.	38
Figura 11. Gráfica de la regresión lineal simple de Producción Total Real y Producción Total Empírica de cacao seco.....	39

Índice de tablas

Tabla 1. Nutrientes extraídos en una tonelada métrica de almendras de cacao seco.	19
Tabla 2. Factores de conversión de los elementos a la forma asimilable por la planta	32
Tabla 3. Eficiencia de la absorción de nutrientes según el método de aplicación	33
Tabla 4. Valores de p-value con respecto a las pruebas estadísticas	34
Tabla 5. Intervalos de confianza de los parámetros de cosecha.....	35
Tabla 6. Concentración de nutrientes extraídos en la almendra para producir 1, 2 y 3 ton ha ⁻¹ año ⁻¹ de cacao seco del clon EET 800	40
Tabla 7. Requerimientos de fertilizantes del clon EET 800 para producir 1, 2 y 3 ton ha ⁻¹ año ⁻¹ de cacao seco.....	42
Tabla 8. Requerimiento de fertilizantes por hectárea al año para el clon EET 800.....	43
Tabla 9. Requerimientos de fertilizantes por hectárea al año para el clon CCN-51	44

Capítulo 1

1. Introducción

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) representa uno de los productos de exportación no petroleros con mayores ingresos económicos en el Ecuador. En 2022, el valor total de exportaciones (FOB) de 1003.47 millones de dólares, debido a la exportación de almendra y productos derivados, como chocolate, manteca, pasta y licor (Corporación Financiera Nacional, 2023).

El sector agrícola presenta retraso tecnológico en sus unidades de producción. Se estima que el 80% de los productores emplean conocimientos y técnicas tradicionales que impacta directamente en la producción de cacao (Almeida Olivo, 2023; García Guerrero, 2023). A pesar de su importancia económica a nivel nacional el promedio, las plantaciones de cacao no alcanzan rendimientos superiores a 0.7 toneladas por hectárea (Corporación Financiera Nacional, 2023).

Por ejemplo, existe poca investigación relacionada con la demanda nutricional de las variedades/clones de cacao y el pronóstico de cosecha. Lo que implica que los productores no apliquen dosis de fertilizantes ajustadas a los requerimientos nutricionales del cultivo como a una producción esperada (Rodríguez, 2019).

El objetivo de este proyecto es validar un modelo productivo para estimar la producción de una plantación de cacao, basado en parámetros morfológicos de mazorcas por efecto de diferentes tratamientos de fertilizantes. Para obtener un plan de fertilización acorde a la demanda nutricional del cultivo y que sea utilizado por pequeños, medianos y grandes productores.

1.1.Descripción del problema

Actualmente, en Ecuador los productores de cacao no emplean modelos que permitan pronosticar la cosecha. Además, la ausencia de información objetiva de las tendencias de producción en base a las fluctuaciones de la cosecha, o la falta de implementación de nuevas tecnologías y prácticas modernas, contribuyen a la ineficiencia en la gestión de los recursos y disminuye el rendimiento (Almeida Olivo, 2023; Pinto Rodríguez, 2019). Estudios establecen que una unidad de producción produce alrededor de una tonelada por hectárea. No obstante, la implementación de técnicas intensivas, como la dosificación ajustada de fertilizantes o el manejo del recurso hídrico; incrementa la producción hasta en tres toneladas por hectárea (Chávez et al., 2018)

Según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador en el 2022, se estima que el país obtuvo una producción total de 337 149 toneladas en 509 179 ha. Siendo esta producción ($0.66 \text{ ton}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) deficiente con el potencial productivo de una plantación tecnificada que puede alcanzar rendimientos de 1 a 3 toneladas por hectárea. En consecuencia, el sector cacaotero dejó de producir entre un 30% y 76% de su producción y cerca de cuatro mil millones de dólares (Corporación Financiera Nacional, 2023). Ahí radica la importancia de emplear técnicas de producción intensiva en base a modelos productivos de pronóstico de cosecha para mejorar los rendimientos del cacao en el país.

1.2. Justificación del problema

El cacao es uno de los comodines más importantes de Ecuador. En el 2023 entre los meses de enero y noviembre generó ingresos por 1 217 millones de dólares (Anecacao, 2023). Sin embargo, existe limitado acceso al extensionismo de nuevas prácticas y tecnologías que se refleja en la reducción de los índices de producción de pequeños y medianos productores a nivel nacional (Newlands et al., 2014).

Actualmente, es relevante contar con planes de fertilización que permitan maximizar el rendimiento por hectárea. En específico, modelos de estimación de cosecha que faciliten al productor su producción futura como una herramienta de comercialización. Por lo tanto, la finalidad de este estudio es cerrar la brecha entre el rendimiento actual (0.66 ton ha^{-1}) y el potencial ($1-3 \text{ ton ha}^{-1}$), a través del estudio de cuatro niveles de fertilización de 0%, 50%, 100% y 150% de NPK. Además, los resultados servirán como un referente metodológico para la incorporación de técnicas avanzadas en el sector.

El proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2, 9 y 12, dado que, fomenta prácticas agrícolas que aumentan la productividad del cultivo contribuyendo a la seguridad alimentaria, impulsa la innovación en el sector agrícola y promueve una producción más eficiente y sostenible para las plantaciones de cacao. Esto se logra a través del uso eficiente de los recursos, lo que a su vez reduce la contaminación y contribuye en la sostenibilidad económica y social de los productores cacaoteros (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un plan de fertilización y un modelo probabilístico para el pronóstico de cosecha del cultivo de cacao, variedad ETT 800, como herramienta para maximizar el nivel productivo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Elaborar un modelo probabilístico para el pronóstico de producción del cultivo de cacao.
- Analizar la exportación de nutrientes en almendras de cacao para el diseño de un plan de fertilización ajustado a la producción de la variedad ETT 800.
- Calcular los costos del plan de fertilización ajustado para la evaluación de los beneficios económicos para un sistema de producción cacaotero.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. El cacao en el Ecuador

El Ecuador, es apreciado mundialmente por la calidad de la almendra y la alta productividad que ofrecen sus materiales vegetales, como el cacao Nacional, CCN-51 o variedades/clones de la Estación Experimental Tropical-EET (Poma Ube, 2023). El cacao Nacional es un grupo genético particular que provee almendras para la industria del chocolate refinado, mientras que CCN-51 se caracteriza por ser una variedad altamente productiva, alcanzando entre una a dos toneladas por hectárea (Abad et al., 2020; Loor et al., 2019).

1.4.2. Floración y fructificación del cultivo de cacao

La planta de cacao (*Theobroma cacao* L.) empieza su etapa productiva a partir del segundo o cuarto año, dependiendo de la variedad, por ejemplo, la variedad CCN 51 fructifica en el segundo año a partir de la siembra (Carrión, 2012). Según, la escala Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt und Chemische Industrie (BBCH), Figura 1, el cultivo presenta dos temporadas florales y reproductivas (enero y agosto). En cada etapa de floración, el cultivo debe ser fertilizado y luego de aproximadamente cinco meses se obtiene la cosecha (Quintero & Díaz, 2004; Niemenak et al., 2010).

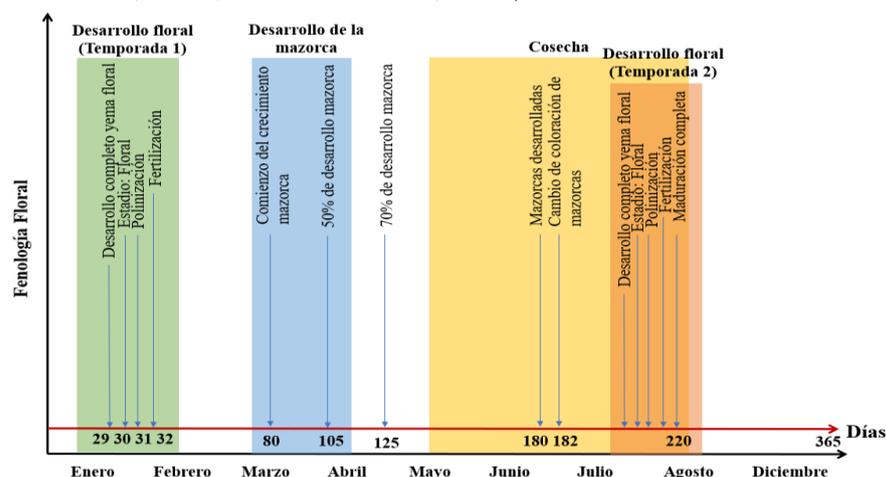


Figura 1. Fenología floral y reproductivas del cultivo de cacao.
Fuente 1: (Bridgemohan, y otros, 2017; Niemenak, y otros, 2010)

1.4.3. Factores de conversión e índices de rendimiento

Los factores de conversión y los índices de rendimiento son información relevante para que el productor evalúe la productividad real de su plantación. Las constantes de peso equivalen a pesos promedios en diferentes fases de la mazorca y almendra, por ejemplo, de 400 kg de mazorcas se obtienen 100 kg de cacao en baba. Los factores de conversión se calculan a partir de las constantes de peso, permite transformar pesos entre las fases, es decir que para convertir cacao en baba a cacao seco se multiplica por el factor de 0.38 (Moreno & Sánchez, 1989).

Por otro lado, los índices de rendimiento son indicadores de la productividad del cultivo, como el índice de mazorca. El índice de mazorca es el número de mazorcas necesarias para obtener un kg de cacao seco, se considera aceptable un promedio de 30 mazorcas (Pari Pariona, 2011; Moreno & Sánchez, 1989).

1.4.4. Variedad EET-800 (Aroma Pichilingue)

La variedad 800 surge debido a la limitante de materiales genéticos altamente productivos. Entre las principales características están que proviene del cruce entre CCN 51 y EET 233, presenta un índice de mazorca de 18, un promedio de 46 semillas por mazorca, un índice de almendra de 1.40 que la ubica en la categoría Arriba Superior Summer Selecta (ASSS). Además, produce más de dos toneladas por hectárea superando a la variedad de CCN 51 (Loor Solórzano et al., 2019).

Otras características del clon, es su floración, que se da en dos épocas del año, en el primer y tercer trimestre, lo que se traduce en dos cosechas anuales. La coloración de la mazorca es un indicativo de su madurez fisiológica; que adquiere una tonalidad amarilla cuando está lista para su cosecha (Loor Solórzano et al.,

2019). En cuanto a su perfil sensorial, es catalogado como cacao fino de aroma debido a la combinación de notas frutales y florales (INEN, 2018).

En Ecuador, la investigación sobre las dosificaciones de fertilizantes para obtener rendimientos de la variedad 800 ha sido limitada. Se ha centrado sólo en estudios sobre la influencia del crecimiento vegetativo o las respuestas morfológicas y fisiológicas a partir de distintas ratios de fertilización (Valdez Paucar, 2022; Gutiérrez Calva, 2022). Un estudio realizado por Sánchez et al. (2015) evaluó 12 clones con parentesco genético a la variedad 800, entre los que se destaca el clon CCN 51. Se aplicó una dosis de Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Magnesio (Mg) y Boro (B) de 18, 6, 22, 3 y 0.53 kg ha⁻¹, respectivamente. Con esta dosis el clon CCN 51 obtuvo una producción superior a una tonelada por hectárea (Gutiérrez Calva, 2022).

1.4.5. Factores que disminuyen el rendimiento de las cacaoteras

Según el Modelo Internacional para el Análisis de Políticas de Productos Básicos y Comercio Agrícola (IMPACT), el rendimiento de una plantación de cacao está en función de los costos de los insumos, implementación de sistemas de riego, factores climáticos y exógenos como, tendencias en el mercado o consecuencias del cambio climático (Kozicka et al., 2018)

Un factor determinante en la disminución del rendimiento en el cultivo de cacao es la carencia de conocimientos de los productores en cuanto al manejo de la fertilización. Con frecuencia, las dosificaciones de los fertilizantes son aplicadas sin un fundamento real, sin considerar las condiciones actuales de la parcela o la cantidad de nutrientes extraídos por las plantas (Herrera Mosquera, 2018).

Rojas (2012) destaca que entre mayor es la tecnificación en el cultivo, la productividad aumenta considerablemente. Esto se logra mediante el uso de clones

mejorados, implementación de sistema de riego, labores culturales y dosificación óptima de fertilizantes.

Adicionalmente, la radiación solar ejerce una influencia directa en la producción. Altas intensidades en los primeros años del cultivo provocan daños en el mecanismo fotosintético de las hojas, lo que explica por qué los sistemas de producción están bajo sombra. Sin embargo, niveles bajos de radiación solar en la etapa productiva del cultivo suprime la producción de flores, por ello es recomendable que la sombra no exceda el 50% (Kozicka et al., 2018; Zuidema et al., 2005).

Un estudio que relaciona el efecto de la sombra y los fertilizantes en la producción del cultivo de cacao, en Ghana, demostró que la interacción entre estas dos variables tiene un impacto positivo. Se obtuvo mejores rendimientos en contraste con los tratamientos sin sombra. Además, las plantas de cacao son más susceptibles a diferentes enfermedades y plagas si no se proporciona árboles que aporten sombra (Ahenkorah et al., 1987).

1.4.6. Nutrición del cultivo de cacao

Los nutrientes del suelo se agotan debido a que las plantas los extraen durante la producción por lo que, es necesario fertilizar para reponerlos y garantizar el suministro de nutrientes a las plantas (Van Vliet & Giller, 2017; Valdez Paucar, 2022). El cultivo de cacao demanda de macronutrientes esenciales para su adecuado desarrollo, entre los que se encuentran el N, P, K, Ca, Mg, S. Asimismo, se requieren micronutrientes tales como B, Zn, Fe, Mn (Gutiérrez Calva, 2022).

Los requerimientos nutricionales de las plantaciones de cacao varían según las condiciones climáticas, tipo de suelo, variedad/híbrido, edad del cultivo e incluso el arreglo espacial (van Vliet et al., 2015). Desde el establecimiento del cultivo en campo hasta los primeros cinco años de la planta requiere de gran disponibilidad de macronutrientes, luego la curva tiende a estabilizarse a partir de este período, como se evidencia en la Figura 2 (Cordero Rojas, 2022).

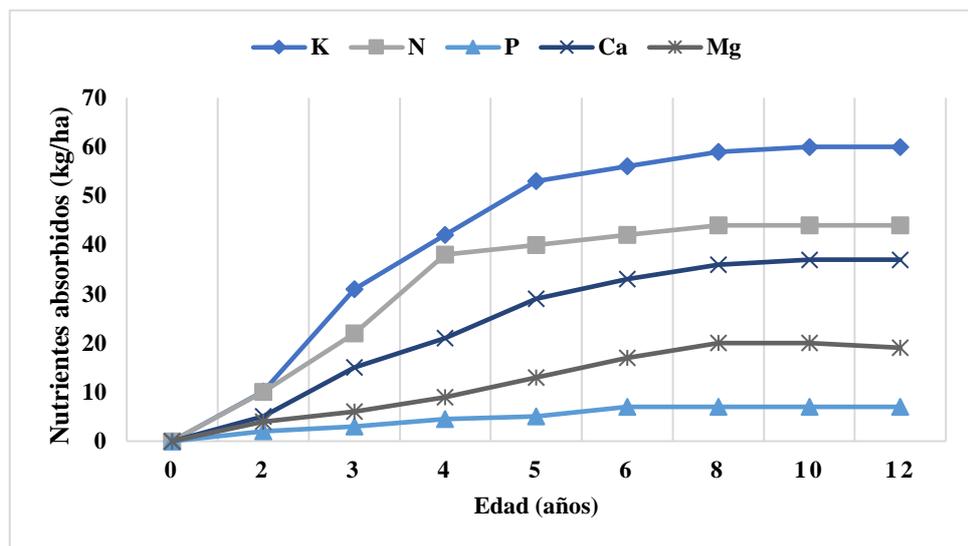


Figura 2. Curva de absorción de nutrientes en el cultivo de cacao

Fuente 2: Ling (1983)

Por otro lado, el uso de los micronutrientes en el cultivo se debe emplear estratégicamente, ya que, se requiere en momentos puntuales del desarrollo de las plantas. Por ejemplo, el elemento boro (B) interviene en el crecimiento del tubo polínico para la fecundación y por ende en la formación del fruto (Macías Cepeda, 2022). Los requerimientos del cacao en plena producción, con una edad de cuatro años, son de 438 kg N, 48 kg P, 633 kg K, 373 kg Ca, 129 kg Mg, 6.1 kg Mn y 1.5 kg Zn (Compañía Nacional de Chocolate, 2021).

1.4.6.1. Costos asociados a la nutrición del cultivo de cacao

Los costos asociados con la fertilización de los sistemas de producción deben representar una relación positiva al sistema, es decir, la inversión debe ser menor a las ganancias obtenidas (Rodríguez, 2019).

Pino (2019) detalla que un sistema no tecnificado del clon CCN-51 se emplea 100 kg de fertilizante edáfico completo y 2 kg de abono foliar por hectárea, esto resulta en un costo de \$70 y \$20, respectivamente.

Por otro lado, Alvarado et al. (2016) evaluaron la rentabilidad de dos sistemas de producción semitecnificado de cacao. El primer sistema tiene un costo de fertilizante edáfico y foliar de \$23470 y \$3641, respectivamente, para suplir la demanda nutricional del cultivo en un área de 102.9 ha y con un rendimiento de 1.87 ton ha⁻¹. El segundo sistema de producción invierte \$30290 y \$8752 en fertilizantes para obtener un rendimiento de 2.6 ton ha⁻¹ en una superficie total de 146.5 ha.

1.4.7. Extracción de nutrientes de las almendras

Los planes de fertilización en el cultivo de cacao consideran los elementos extraídos por las plantas para su desarrollo, etapa de reproducción y formación de los frutos. En la Tabla 1, se especifica los nutrientes extraídos por el cultivo durante la formación del fruto. Se evidencia que el macroelemento de mayor influencia en la mazorca es el K (Amores, 2009). Según Zavala (2008) para producir 1200 kg de almendra se requieren de 35 kg N, 10 kg P₂O₅, 50 kg K₂O, 13 kg CaO y 15 kg de MgO. Estos datos concuerdan con los resultados de Amores (2009) mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. *Nutrientes extraídos en una tonelada métrica de almendras de cacao seco.*

Partes de la mazorca	kg/ha						g/ha				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S	B	Zn	Cu	Fe	Mn
Cáscara	9.1	2.5	39.4	8.7	4.3	1.5	28.8	35.9	8.8	32.5	58.7
Almendras	15.8	7.3	8.9	3.6	3.7	1.2	20.6	33.8	16.8	50.3	17.6
Raquis	0.4	0.1	0.7	0.2	0.1	0	0.9	0.7	0.4	3.5	0.4
Total	25.3	9.9	48.9	12.5	8.1	2.7	50.4	70.4	25.9	86.2	76.6

Nota. Datos tomados de Amores (2009).

En las plantaciones se recomienda que las cáscaras sean incorporadas al suelo para el retorno de los nutrientes (Leiva Rojas, 2012). Un estudio realizado por Hougni et al. (2021) cuantificó los patrones de liberación de los nutrientes de las cáscaras bajo diferentes precipitaciones. A los 25 días se evidenció mayor pérdida de nutrientes, un 33% de K y menos del 15% de los elementos Mg, Ca y N se perdieron por lixiviación provocada por las lluvias intensas.

1.4.8. Pronóstico de cosecha

El pronóstico de cosecha conlleva la estimación de la producción esperada de un cultivo, de forma que sea cuantificable los volúmenes de un cultivo antes de finalizar el periodo de cosecha (Martínez Moreno, 2022). Salcedo et al. (1988) señalan que el objetivo principal del pronóstico de cosecha es lograr una estimación precisa de la producción proporcionando un margen de seguridad. Esto permite programar labores culturales, identificar oportunidades en los mercados nacionales e internacionales y cuantificar los costos asociados al mantenimiento del cultivo (Newlands et al., 2014).

Según Ramos (2017) existen estrategias para la medición de la producción en cualquier cultivo, partiendo de modelos agronómicos basados en simulaciones

y datos reales, modelos según el tipo de planta a trabajar y modelos de valoración con interacciones.

Por ejemplo, Cleves J. et al. (2016) plantearon un modelo de balance simple para la estimación de contenido de agua durante el crecimiento del cultivo de maíz. Para que sirva de reservorio de agua disponible y ajuste las necesidades hídricas del cultivo según el modelo. Los modelos de los cultivos son una forma amigable para el usuario en el proceso de toma de decisiones. Una herramienta que aproxima la capacidad productiva, según las condiciones edafoclimáticas del lugar de plantación (Hernández N. et al., 2009).

1.4.8.1. Factores que intervienen en el pronóstico de cosecha

El rendimiento de un cultivo constituye una variable compleja. Está influenciada directamente con factores climáticos, ambientales y genéticos (Newlands et al., 2014). Los factores que influyen en un pronóstico de cosecha en cualquier cultivo son todos aquellos que puedan alterar el resultado a gran escala. Por ejemplo, el tamaño de la muestra determina cual será el nivel de incertidumbre en un conjunto de datos. Puesto que, al momento del análisis estadístico, el valor de la varianza del error deberá ser bajo si se escoge un número correcto con respecto al tamaño de la muestra. Por tanto, debe ser representativa para la estimación (Martínez Moreno, 2022).

Otro factor predominante en la gestión de los cultivos son los modelos agroclimáticos. Estos modelos estiman el comportamiento del cultivo según las diferentes condiciones. Esto afecta al pronóstico de cosecha puesto que, un modelo como tal, predice el momento óptimo de la cosecha en función de las condiciones climatológicas existentes. Con ello,

se puede gestionar decisiones provisorias en el cultivo, tal como desastres naturales (Martínez Moreno, 2022).

El tiempo es otro de los factores que influye en la aplicación de una metodología capaz de estimar los rendimientos en el cultivo. En cacao, es necesario evaluar el tiempo exacto en el que se podrá hacer la proyección. Por lo que, se recomienda hacerlo antes de la cosecha, para así tener una base referencial de parámetros de las mazorcas. A partir de esto se puede empezar un seguimiento y finalmente una función o modelo capaz de pronosticar el volumen esperado de granos en una unidad de producción (Rainforest Alliance, 2021; Martínez Moreno, 2022).

1.4.9. Modelo productivo para el pronóstico de cosecha

Un modelo es una representación simplificada de un sistema con cierto margen de error, pretende crear una réplica del sistema mediante ecuaciones matemáticas con variables aleatorias (Hernández et al., 2009). Por otro lado, la modelación es el proceso para desarrollar el modelo, se emplea para precisar qué factor provoca variación en la variable de interés (Di Rienzo et al., 2005). Para que el modelo desarrolle una imitación más precisa de la situación real se debe realizar simulaciones (Montoya et al., 2009).

La estimación de rendimientos en unidades de producción agrícola utiliza los conceptos de producción media y función de riesgo. Esto se debe a que los factores implicados en el rendimiento de los cultivos pueden alterar los resultados, tales factores asociados al ambiente como clima y suelo. La función de producción media para cacao tiene el objetivo de controlar el rendimiento promedio en un área determinada o de toda la unidad de producción, y así hacer proyecciones sobre la cosecha esperada (Rainforest Alliance, 2021).

Los modelos de producción agrícola se han enfocado en la estimación de rendimientos de cultivos de ciclo corto. Dado que, la disponibilidad de datos para los cultivos perennes conlleva limitaciones o la posibilidad de acumulación de errores en las simulaciones a largo plazo. Los modelos de producción aplicados al cultivo de cacao han fundamentado su enfoque en modelos de regresión adaptados a condiciones y variables particulares, lo que limita su aplicabilidad general. Asimismo, los modelos conceptuales empleados no proporcionan una estimación precisa del rendimiento del cultivo y carecen de idoneidad para su predicción (Zuidema et al., 2005).

El modelo de simulación fisiológica del crecimiento y producción del cacao (SUCROS-Cocoa) desarrollado por Zuidema et al. (2005) calcula la intercepción de luz, fotosíntesis, producción de biomasa y rendimiento de granos de cacao en un sistema bajo sombra. El modelo emplea 85 parámetros morfológicos y fisiológicos que no son específicos de una zona o variedad, permitiendo que sea aplicable en cualquier producción de cacao potencial (Kozicka et al., 2018; Zuidema et al., 2005).

Este modelo evidenció un 50% de las variaciones del rendimiento en las localidades, debido a la limitación hídrica en las estaciones de sequía intensas y suelos desfavorables, como arcillosos o arenosos. Además, se constató que niveles de sombreado superiores al 60% redujeron los rendimientos más de un tercio, mientras que niveles moderados provocaron una reducción del 10% (Zuidema et al., 2005).

Por otro lado, la certificadora de cultivos Rainforest Alliance, desarrolló una metodología para estimar el rendimiento de las plantaciones de cacao. Calcula la densidad de los árboles productivos y contabiliza las mazorcas de cada planta.

Se obtiene el número promedio de vainas por árbol y se multiplica con el peso promedio de almendra en baba de una mazorca que es 0.04 kg, esto da lugar a la producción promedio por árbol. Luego, esta cantidad se la aproxima al área total del productor. Además, considera un factor de ajuste por prácticas agrícolas que no se desarrollen como el control de plagas o la poda (Rainforest Alliance, 2021).

1.4.9.1.El pronóstico de cosecha y su influencia en el precio del cacao en el mercado mundial

Es usual que la tendencia de los precios del cacao en el mercado sea en base a un pronóstico de cosecha (Sun et al., 2023). La predicción de la cosecha se emplea para prevenir las consecuencias de las fluctuaciones de los precios y en base a esto implementar estrategias en la producción (Sukiyono et al., 2018).

Los precios de los productos agrícolas se ven afectados por la oferta y la demanda, el cambio climático, los costos y los problemas en la producción. A partir de estos factores, se emplea modelos de regresión lineal para pronosticar los precios. Sin embargo, este método requiere de gran cantidad de datos para estimar las variables del modelo. No son eficaces si los datos presentan variaciones, datos atípicos o no lineales, siendo ideales para pronósticos de cultivos de ciclo corto (Sun et al., 2023).

Sukiyono et al. (2018) señalan que la selección del método de pronóstico depende de los datos históricos de la producción. También, mencionan que los modelos más aplicados en el pronóstico son el promedio móvil integrado autorregresivo (ARIMA), descomposición aditiva y multiplicativa y suavización exponencial (Sukiyono et al., 2018).

Un ejemplo particular es el modelo IMPACT, que emplea series de tiempo univariado y basa su análisis en el modelo ARIMA. Se pronostica rendimientos futuros empleando valores históricos para cada país productor de cacao. Se utilizan pocos parámetros y especificaciones concisas, asumiendo que el rendimiento seguirá una trayectoria similar a la anterior. Este enfoque, aplicado al cultivo de cacao, aprovecha la naturaleza perenne de la planta y su largo ciclo de producción para prever rendimientos futuros basados en datos históricos (Kozicka et al., 2018).

El modelo se usó para predecir los rendimientos futuros de cacao en Ecuador hasta el 2050. Se obtuvo que ARIMA e IMPACT pronostican 0.26 y 0.36 toneladas por hectárea, respectivamente. Sin embargo, considerando la reciente renovación de plantaciones, mejoras en rendimientos y objetivos futuros se espera un mejor desempeño del sector cacaotero (Kozicka et al., 2018).

Capítulo 2

2. Metodología

El presente trabajo se lo realizó en 3 etapas. A continuación, se expone el diagrama con la metodología empleada para este proyecto. Se obtuvo un modelo probabilístico basado en la exportación de macro y micronutrientes sumado a un plan de fertilización ajustado a las concentraciones totales de los elementos en las almendras de cacao seco.

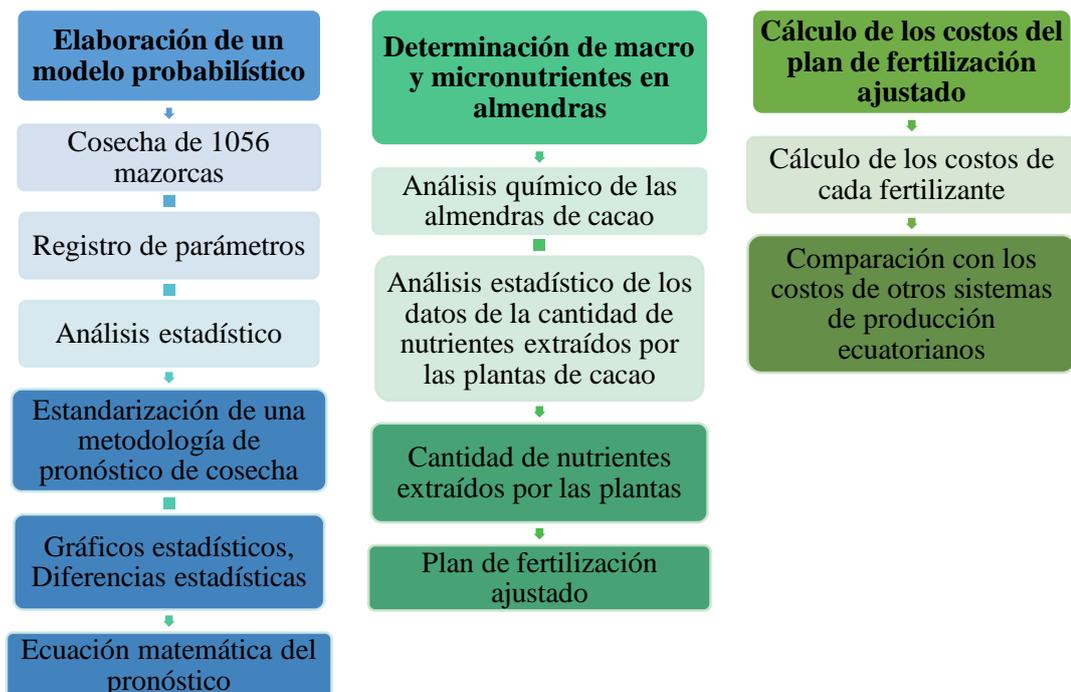


Figura 3. Diagrama de la metodología

2.1. Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la Granja Experimental Agrícola (GEA) situada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas, las coordenadas geográficas son 2° 8'24.67" de Latitud Sur y de 79°57'31.82" Longitud Oeste. La temperatura promedio del sitio varía entre 23 °C hasta 25.3°C; la precipitación anual oscila entre 57 a 395 mm (Lara Avilés, 2016; Climate Data, 2023).

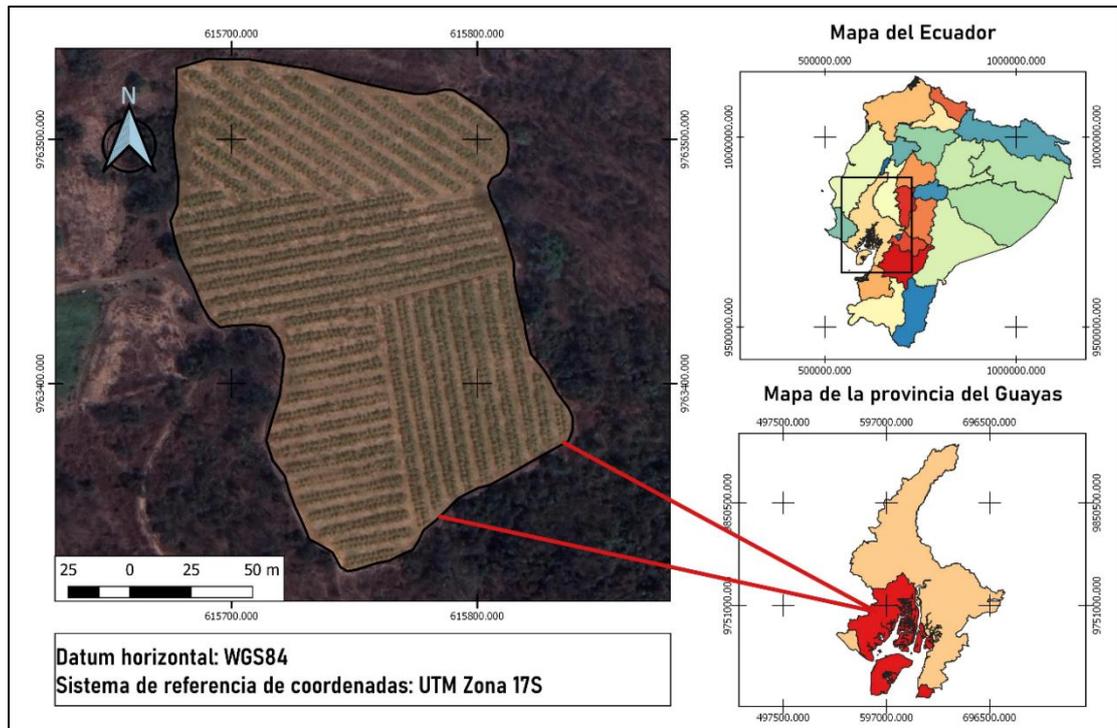


Figura 4. Zona de estudio

2.2. Características del ensayo experimental

El área del cultivo de cacao del clon EET-800 abarca 2 hectáreas con 3 años de plantado al inicio de la investigación. Aquí se estudia el efecto de la aplicación combinada de tres dosis de fertilizantes NPK (50, 100 y 150%) más un control, el experimento tiene un total de 33 tratamientos. Se subdivide en 88 parcelas con 26 plantas dispuestas en doble hilera.

2.3. Obtención de las muestras de mazorcas

La metodología de muestreo usada para el pronóstico de cosecha durante la investigación fue establecida por el Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de la ESPOL.

La cosecha de las mazorcas se realizó durante los meses de octubre y noviembre, siendo el último mes, el pico de cosecha. Por cada parcela se evaluaron las seis plantas centrales de las cuales se recolectó una mazorca por planta. Solo

mazorcas maduras fueron seleccionadas para el estudio. En total se recolectaron 1056 mazorcas.

2.4.Registro de parámetros de las mazorcas

Por cada mazorca se registró el largo, diámetro y peso húmedo. El largo se midió con una cinta métrica desde la base del pedúnculo hasta la base del ápice y el diámetro abarcó la parte central de la mazorca, Figura 5. Por cada mazorca se separaron las almendras de la placenta. Se registró el peso húmedo de las almendras con mucílago y sin placenta. Se contabilizó el número de almendras por mazorca. Adicionalmente se registró el peso húmedo de 100 granos obtenidos al azar de las seis mazorcas muestreadas por tratamiento para determinar el porcentaje de humedad.

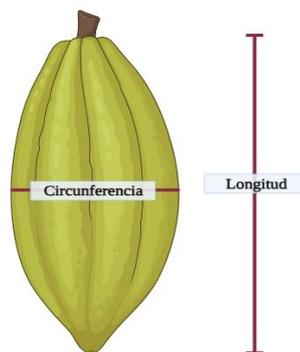


Figura 5. Esquema del fruto donde se indica la ubicación de los parámetros de longitud y circunferencia

Las muestras fueron secadas al aire libre por cinco a diez días hasta alcanzar una humedad del 7%, humedad a la que se comercializa el cacao. Con el peso seco de los 100 granos se calculó el porcentaje de humedad según la metodología establecida por Aguilar (2016):

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} \times 100 \quad (2.1)$$

El índice de mazorca (IM) se calculó mediante la fórmula empleada en el estudio de Pari (2011):

$$IM = \frac{\frac{\# \text{ de semillas pesadas} \times 1000}{\text{Peso de 100 semillas}}}{\# \text{ almendras por mazorca}} \quad (2.2)$$

2.5. Análisis químico de almendra

Para la determinación de la concentración de nutrientes en la almendra se siguió la metodología establecida por el laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de la ESPOL. Los macros y micros nutrientes, excepto el nitrógeno, se analizaron en un Espectrofotómetro de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo modelo Avio 550 Max de la marca Perkin Elmer (ICP-OES) (CSIC, 2019) mientras que el N fue analizado en analizador de carbono y nitrógeno modelo Vario Macro Cube de la marca Elementar.

2.5.1. Preprocesamiento de almendras secas

Las muestras de cacao seco se trituraron en una licuadora industrial y se tamizaron mediante tamices de 3 mm para obtener 200 g, luego las muestras se almacenaron en fundas con su respectivo código.

2.5.2. Digestión de las muestras

Las muestras de almendra previamente procesadas permanecieron en la estufa a 77 °C durante 24 horas antes de su análisis. En un tubo de digestión se pesó entre $0.500 \pm 0,01$ g. Luego, se adicionó 6 ml de ácido nítrico (HNO₃) concentrado y 1000 µl de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30%. Los tubos se colocaron en el sistema de digestión microondas modelo Ethos Up marca Milestone por tres horas para que se descomponga la materia orgánica a componentes más simples, esto se logra por ser un sistema cerrado y la elevada temperatura (González, 2014).

La muestra resultante se traspasó a un tubo de borosilicato de 50 ml, se colocó en el bloque digestor modelo JG-120F marca Remadel y cada tubo fue cubierto con el vidrio reloj y las muestras se digieren a 70 °C hasta que el líquido se evapore completamente. Después, se añadió agua Tipo 1 a la muestra hasta completar 25 ml en los tubos volumétricos y ser almacenados hasta su posterior lectura.

2.5.3. *Determinación de concentraciones*

Las muestras se transfirieron a los tubos volumétricos de 15 ml y se colocaron en el equipo ICP-OES para su análisis. Antes calibraron el equipo ICP-OES para los elementos K, P, Ca, B, Mg, Zn y S.

2.5.4. *Método Dumas*

Se analizó las concentraciones de nitrógeno de las almendras mediante el método Dumas. Las muestras se pesaron en papeles de estaños en la balanza analítica, con un peso aproximado entre 20 a 25 g, y cada una se envolvió hasta formar una pastilla. Las muestras fueron colocadas en el equipo CN Analyzer en el cual se produce una pirólisis completa. Durante este proceso, se generan gases de combustión como óxido nítrico (NO) o dióxido de carbono (CO₂). El equipo determinó las concentraciones de cada elemento, entre estos el nitrógeno total (Romero, 1997).

2.6. Análisis estadísticos de los parámetros de cosecha

Con los parámetros de las mazorcas se realizó el análisis estadístico con el software Java Memory Profiler (JMP Pro-17). Se evaluó la variabilidad de los datos y el comportamiento de la producción en los diferentes tratamientos mediante gráficos estadísticos, medidas de tendencia central y dispersión.

Mediante el software R y RStudio se determinó las diferencias significativas de los parámetros de mazorca. En la Figura 6, se muestra el diagrama de flujo que permitió evaluar si los parámetros cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad, que se requieren para aplicar ciertos tipos de análisis, como el ANOVA.

La normalidad fue determinada con la prueba Shapiro-Wilks, si p-value es menor al nivel de significancia (0.05) se rechaza la hipótesis nula de que los datos son normales, por el contrario, si es mayor se acepta la hipótesis de que los datos cumplen la normalidad (Flores Tapia & Flores Cevallos, 2021).

Para evaluar la homogeneidad de varianzas (Correa et al., 2006) utilizó la prueba Levene y, prueba de Bartlett. Para estas pruebas se empleó las siguientes hipótesis:

H₀: Existe homogeneidad en la varianza de los tratamientos de fertilización.

H_a: No existe homogeneidad en la varianza de los tratamientos de fertilización.

Se obtuvo que las hipótesis nulas se rechazaron por lo que se aplicó la prueba de Kruskal Wallis en caso de cumplir homogeneidad, para las variables que no fueron homogéneas se aplicó ANOVA con corrección de Welch (Flores Tapia & Flores Cevallos, 2021). Para estas pruebas se emplearon las siguientes hipótesis:

H₀: Las medias de los tratamientos de fertilización son iguales entre sí.

H_a: Las medias de los tratamientos de fertilización no son iguales entre sí.

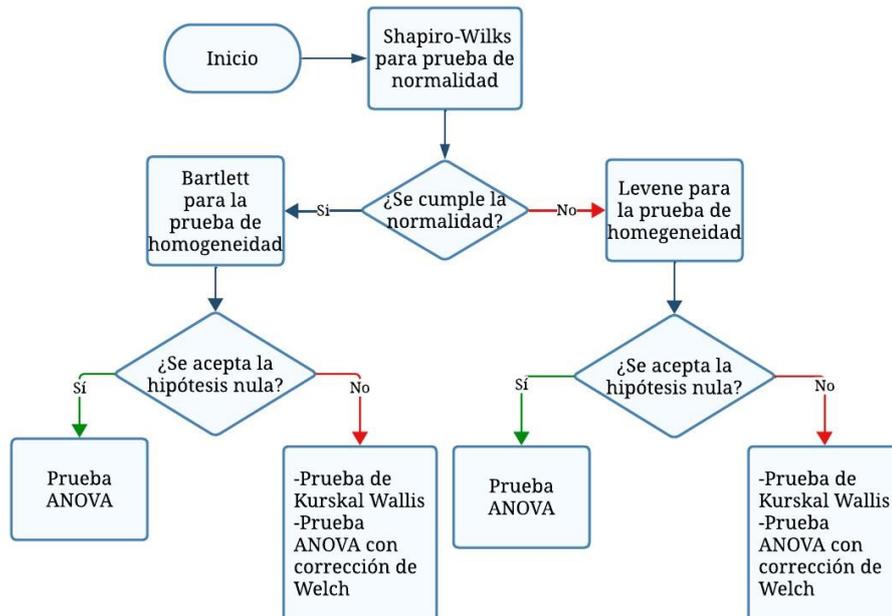


Figura 6. Diagrama de flujo de pruebas estadísticas para evaluación de supuestos de normalidad y homogeneidad

2.7. Modelo para el pronóstico de cosecha

Las variables utilizadas para el modelo fueron producción total de peso húmedo y producción almendra seca por hectárea estimado con el factor de conversión (0.33) establecido por el Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de la ESPOL, según datos de cosechas pasadas.

Para la producción total de almendra seca se estimó la producción total mediante el promedio de las dos cosechas realizadas y se multiplicó por el número de mazorcas obtenidas en cada tratamiento de fertilización. Con los datos obtenidos del método empírico del laboratorio y los datos reales del clon se realizó un modelo de regresión lineal para comparar y relacionar dichas variables.

2.8. Diseño del plan de fertilización

En el diseño del plan de fertilización se tomó como referencia el Modelo de Tasa de Fertilizante de cacao desarrollado por Jiska Van Vliet. Se empleó los datos de producción total (kg ha^{-1}) y los resultados del análisis de almendra de cada parcela. Se calculó la concentración total por kg de cada elemento (N, P, K, Ca, Mg, B y Zn) extraído por la almendra, luego se extrapoló esta cantidad a una producción de 1, 2 y 3 toneladas de cacao seco por hectárea. Además, por extrapolación se determinó la cantidad mínima, media y máxima de nutrientes que se requiere para las producciones mencionadas arriba, manteniendo los intervalos de confianza al 95%.

Adicionalmente, los elementos fueron transformados a la forma asimilable por las plantas, por lo que, se multiplicó por el factor de conversión por cada elemento utilizado en base a la Tabla 2. En el caso de N no se empleó un factor de conversión, ya que los fertilizantes utilizados solo se componen de N, no de nitratos o amonio. También se consideró la eficiencia de la absorción de los fertilizantes que depende de la forma de aplicación del producto. En la tabla 3, se muestra el porcentaje de eficiencia en una aplicación manual y por fertirriego.

Tabla 2. Factores de conversión de los elementos a la forma asimilable por la planta

De elemento	A forma asimilable	Factor de conversión
P	P_2O_5	2.2
K	K_2O	1.20
Ca	CaO	1.40
Mg	MgO	1.66
B	B_2O_3	3.22
Zn	ZnO	1.25

Nota: Datos tomados de (Thompson & Troeh, 1892), (Navarro & Navarro, 2023)

Tabla 3. *Eficiencia de la absorción de nutrientes según el método de aplicación*

Nutriente	Aplicación manual	Fertirriego
N	50 %	80%
P	30 %	40%
K	40%	60%
Ca	40%	60%
Mg	40%	60%
Micronutrientes	50%	60%

Nota: Datos tomados de (Marín Olivares, 2016)

Dependiendo del fertilizante y del porcentaje del nutriente en el fertilizante se calculó la dosis del producto a utilizar. Se empleó la siguiente expresión de acuerdo con el manual técnico de la FAO (2002):

$$Dosis\ de\ Fertilizante\ \left(\frac{kg}{ha}\right) = \frac{Requerimiento\ nutricional \times 100}{\% \ de\ nutriente\ en\ el\ fertilizante} \quad (2.3)$$

2.9. Costos

El requerimiento de cada elemento se dividió por el peso total del saco de fertilizante para obtener el número de sacos necesarios para la producción requerida. Se debe considerar el precio actual del fertilizante en el mercado nacional para calcular el costo total para cada producción esperada del plan de fertilización. Finalmente, se comparó el costo del plan de fertilización propuesto para el clon EET-800 y los costos de fertilización del clon CCN-51, ya que tienen parentesco genético.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1. Análisis estadístico de los parámetros de cosecha

Se utilizaron pruebas no paramétricas, puesto que los datos presentaron una distribución no normal y la cantidad de repeticiones por tratamientos de fertilización no fueron significativos para el uso de pruebas paramétricas.

En la Tabla 4, se muestra los resultados de las pruebas estadísticas de Levene, Kruskal Wallis y ANOVA con corrección de Welch de producción total, número de granos e índice de mazorca.

Tabla 4. Valores de p-value con respecto a las pruebas estadísticas

Prueba estadística	Producción total-	Número de granos-	Índice de mazorca-
	Tratamiento (p-value)	Tratamiento (p-value)	Tratamiento (p-value)
Levene	0.004953 **	0.3518	0.2533
Kruskal- Wallis	0.9738	0.03339	0.941
ANOVA con corrección de Welch	0.7048	0.03041	0.8287

Nota: ** significancia, p-value 0.05

La distribución de los parámetros obtenidos permitió la comprensión de la variabilidad de los valores estudiados. En la Tabla 5, se identificó que el 95% de los casos empleados para futuras investigaciones, el intervalo de confianza capturará el valor real de la media poblacional. Los rangos mostrados de las variables analizadas determinan el intervalo permitido para el pronóstico de la cosecha, con el estadístico de prueba como la media.

Tabla 5. Intervalos de confianza de los parámetros de cosecha

Parámetros	IC superior (95%)	Media	IC inferior (95%)
Producción de cacao seco (kg/ha)	1687	1589	1490
Número de granos	43.7	43.2	42.8
Índice de mazorca	40	37	35

Nota: Intervalo de confianza (IC)

3.1.1. Producción Total

En la Figura 7, se observa la distribución de las medias de los datos de producción total (kg/ha/año) en función de los diferentes tratamientos de fertilización. Se evidencia la variabilidad entre los datos de tratamientos, que se centran en un rango de 1490 a 1687 kg ha⁻¹ con 95% de confianza, Tabla 5.

Según los datos analizados en la Tabla 4, no hay pruebas estadísticas para rechazar la hipótesis nula. Es decir, no hay diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización que influyen en la producción total de almendra seca.

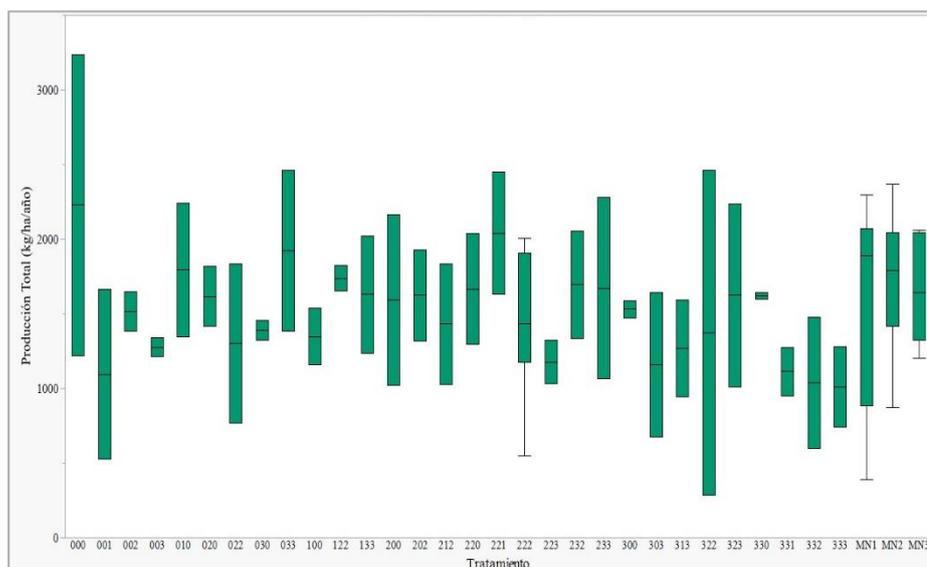


Figura 7. Diagrama de caja de la producción total (kg/ha) por tratamiento de fertilización

Aunque en las pruebas estadísticas no se encontró significancia estadística, se observó diferencia en los niveles de producción entre los tratamientos de fertilización. En la Figura 8, se observa que los tratamientos 010, 033, 133, 200, 220, 221, 222, 233, 322, 323, MN1, MN2 y MN3 produjeron el doble de toneladas en comparación con el resto de los tratamientos. Sin embargo, el tratamiento MN1 evidencia una producción muy baja, menor a 400 kg ha⁻¹ a comparación con el resto de los tratamientos. Se evidencia, mayor producción cuando la dosis de fertilizantes correspondió a la aplicación de 100% de N, 150% de P y 50% de K.

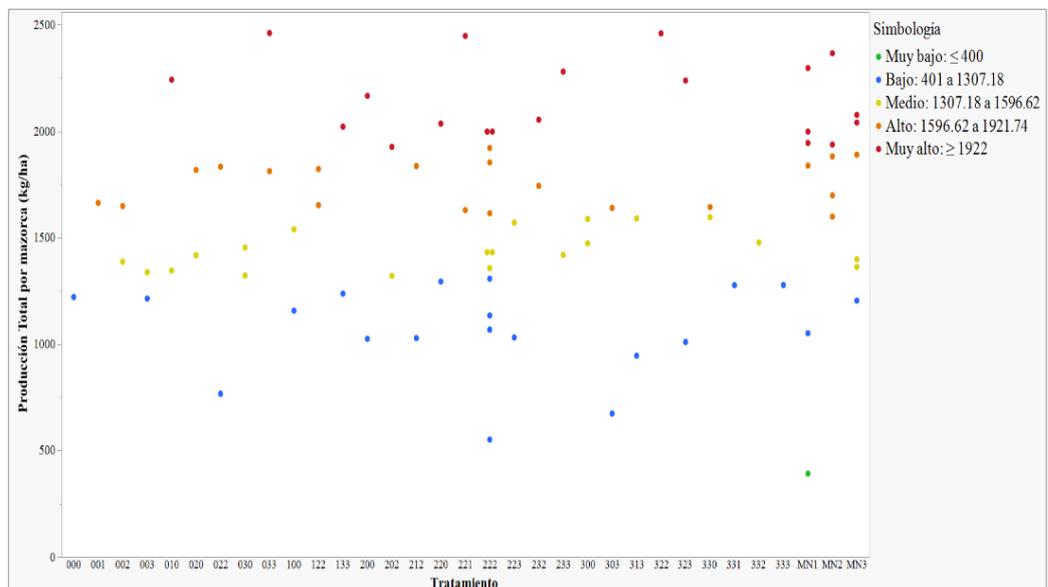


Figura 8. Gráfico de puntos de rangos de producción total de cacao seco (kg/ha) por tratamiento

Nota: Los puntos representan: verde producciones ≤ 400 kg/ha, azul producciones entre 401 a 1307.18 kg/ha, amarillo producciones entre 1307.18 a 1596.62 kg/ha, naranja producciones entre 1596.62 a 1921.74 kg/ha y rojo producciones ≥ 1922 kg/ha.

3.1.2. Número de almendras

En la Figura 9, se muestra la cantidad de almendras en dos cosechas en función de los tratamientos aplicados. Se evidenció que no existió homogeneidad de los datos. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre la media de los tratamientos, denotando que, al menos

un tratamiento influyó en la producción de almendras. El tratamiento con mayor número de granos fue el 323 con un valor máximo de 51 almendras y el tratamiento 223 obtuvo la menor cantidad con 31 almendras.

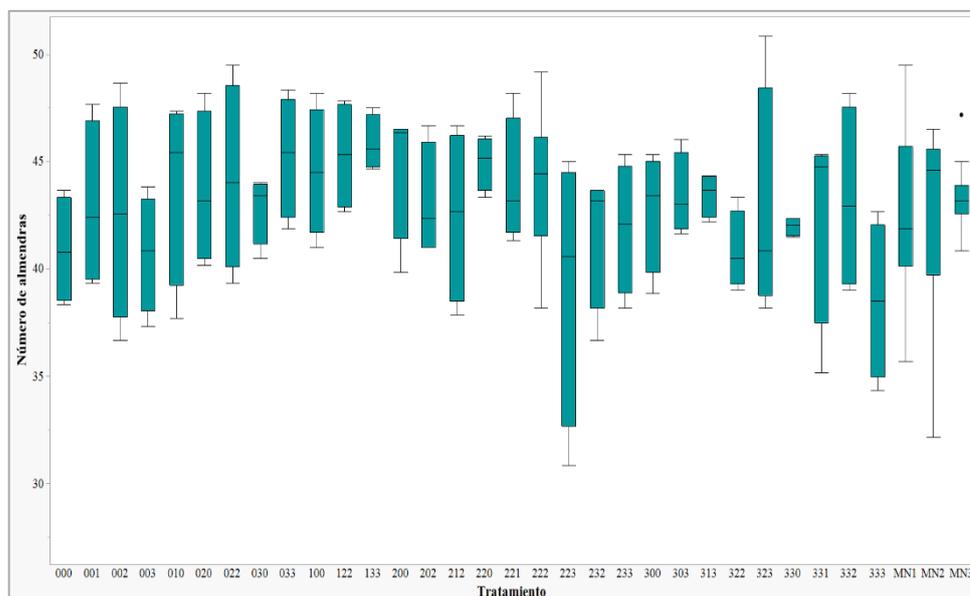


Figura 9. Diagrama de caja del número de almendras por mazorca para cada tratamiento de fertilización

Se ha evidenciado en estudios de Loor et al. (2019) que el clon EET 800 produce 46 semillas por mazorca, dato que se aproxima notablemente a los resultados del número de almendras por mazorca del presente estudio, los cuales indican una cantidad de 43 a 42 semillas por mazorca con un 95% de confianza.

3.1.3. Índice de mazorca

Se estima que el índice de mazorca tiene un intervalo de confianza de 40 a 35. En la Figura 10, se observa que los tratamientos 010, 033, 122, 221, 232, 233, 322 y MN1 obtuvieron un IM mayor a 40, por otro lado, los tratamientos 000 y 303 presentaron un IM menor a 30.

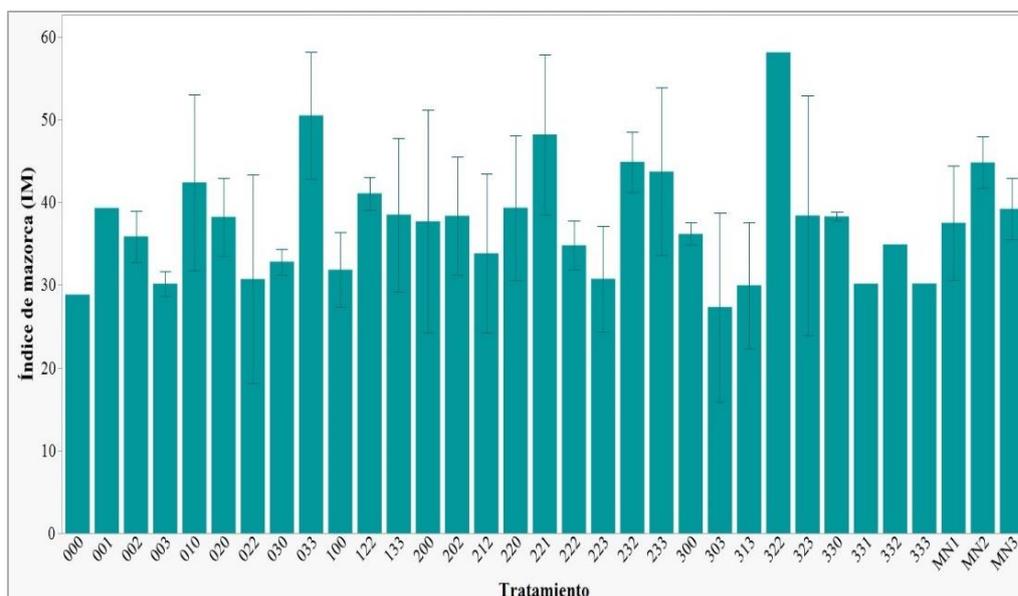


Figura 10. Índice de mazorca (IM) según el tratamiento de fertilización. Las barras representan el error estándar de las réplicas de los tratamientos.

Loor et al. (2019) señala que la variedad 800 presenta un índice de mazorca de 18, lo que difiere con los resultados obtenidos en este proyecto, ya que se obtuvo un promedio de IM de 37. Sin embargo, Moreno y Sánchez (1989) indican que un índice de mazorca de 30 se considera aceptable.

3.2. Modelo para pronóstico de cosecha

La Figura 11 muestra la relación positiva entre la Producción Total Real-PTR (kg/ha) y la Producción Total Empírica-PTE (kg/ha). Esto significa que a medida que aumenta el valor de la variable independiente (Producción Total Empírica), también aumenta el valor de la variable dependiente (Producción Total Real), aunque no de forma proporcional.

La ecuación del modelo es el siguiente:

$$PTR \left(\frac{kg}{ha} \right) = 1.5108671 \times PTE \left(\frac{kg}{ha} \right) - 57.62438 \quad (3.1)$$

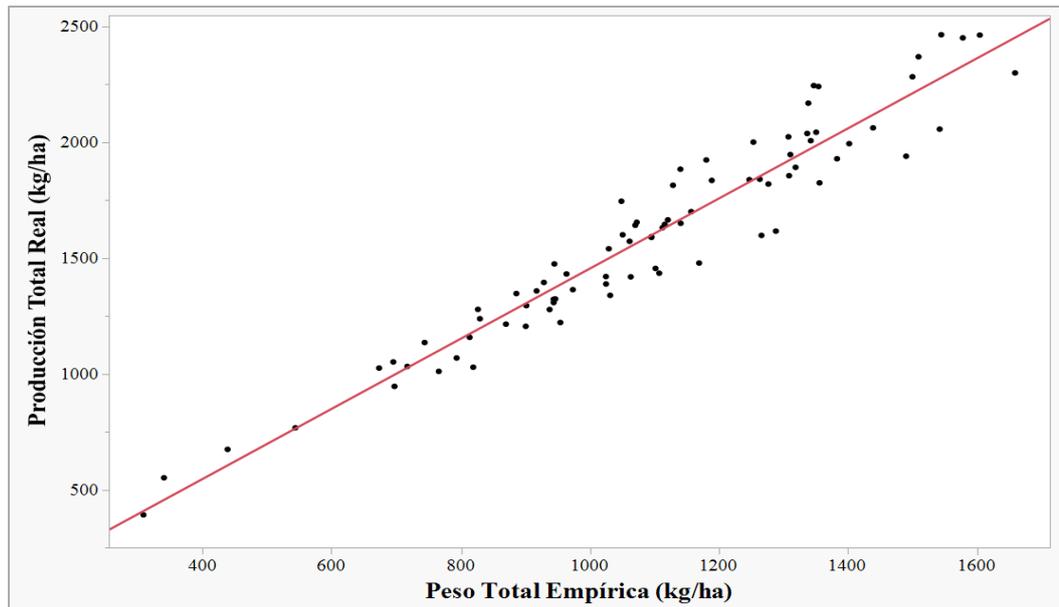


Figura 11. Gráfica de la regresión lineal simple de Producción Total Real y Producción Total Empírica de cacao seco

La pendiente de la recta (1.51) indica el cambio promedio con la variable dependiente por cada unidad de la variable independiente. En este caso, por cada kg/ha que aumente la Producción Total Empírica, se estima que la Producción Total Real aumente aproximadamente un 50% más de lo que se estima con la forma empírica.

El término constante (-57.6) es el valor de la variable dependiente cuando la variable independiente es cero. En este caso, cuando la Producción Total Empírica es cero, la Producción Total Real es -57.6 kg/ha. Sin embargo, este valor no tiene mucho sentido práctico, ya que la producción en un sistema agrícola no puede ser negativa.

El coeficiente de correlación del modelo es 0.963, lo que señala una fuerte asociación lineal entre las dos variables. El valor de R^2 es 0.927, indica que el 92.74% de la variación en la Producción Total Real se puede explicar por la Producción Total Empírica. El R^2 ajustado es 0.926, que es una medida corregida de R^2 que tiene en cuenta el número de variables predictoras en el modelo.

3.3. Plan de fertilización

La Tabla 6 muestra los rangos de las formas asimilables de los nutrientes que son exportados hacia la almendra para obtener una producción de 1, 2 y 3 toneladas por hectárea. Se presentan intervalos de confianza al 95% para los valores medios. El nutriente más exportado es el N, seguido de K₂O y P₂O₅.

Tabla 6. Concentración de nutrientes extraídos en la almendra para producir 1, 2 y 3 ton ha⁻¹año⁻¹ de cacao seco del clon EET 800

Producción	Nutrientes	IC inferior (95%)	Media	IC superior (95%)
		kg/ha/año		
1 tonelada	N	45.4	46.2	47
	P ₂ O ₅	10.37	10.52	10.66
	K ₂ O	25.18	25.65	26.11
	CaO	2.07	2.11	2.14
	B ₂ O ₃	0.02	0.02	0.02
	MgO	5.38	5.44	5.50
	ZnO	0.364	0.426	0.488
2 toneladas	N	90.8	92.4	94
	P ₂ O ₅	20.8	21.1	21.4
	K ₂ O	50.4	51.3	52.2
	CaO	4.13	4.20	4.29
	B ₂ O ₃	0.0309	0.0317	0.0325
	MgO	10.8	10.9	11.0
	ZnO	0.728	0.853	0.974
3 toneladas	N	136.2	138.6	141
	P ₂ O ₅	31.1	31.5	32.0
	K ₂ O	75.6	76.9	78.3
	CaO	6.20	6.32	6.43
	B ₂ O ₃	0.0464	0.0476	0.0488
	MgO	16.1	16.3	16.5
	ZnO	1.09	1.28	1.46

Nota: Intervalo de Confianza (IC)

En el análisis de los resultados relacionados con los nutrientes esenciales exportados por las almendras, se observan diferencias significativas entre los datos presentados en la Tabla 7 y las investigaciones previas de Zavala (2008) y Amores (2009). En cuanto al N, la Tabla 7 revela un rango de extracción de 45.4 a 47 kg N ha⁻¹, en contraste con el requerimiento de 35 kg N ha⁻¹ mencionado por Zavala y una extracción de 25.3 kg N ha⁻¹ señalada por Amores. Esta discrepancia sugiere que los resultados de este proyecto presentan valores más elevados de extracción de este nutriente. Esta diferencia puede atribuirse a factores morfológicos y productivos del cultivo, necesitaran más N para sustentar sus actividades vitales previas a la cosecha y cuaje del fruto.

Para K, Ca y Mg se presentan rangos de extracción inferiores a los reportados en los estudios. En conclusión, la diferencia en los niveles de N, K, Ca y Mg podría atribuirse a variaciones de los materiales genéticos, condiciones edafoclimáticas u otros factores experimentales evaluados en cada estudio. La única coincidencia observada se encuentra en los niveles de P.

La Tabla 1 muestra que cada parte de la mazorca de cacao extrae diferentes concentraciones de nutrientes y se evidencia que la cáscara concentra nutrientes en mayor proporción. En el presente plan de fertilización solo se repone lo que las plantas requieren para producir las almendras. Sin embargo, en la cosecha, las cáscaras son dejadas en la plantación para que se descompongan por acción del riego o lluvia, y los nutrientes se lixivien para ser fuente significativa de nutrientes en el cultivo. Conforme a las conclusiones obtenidas por Hougni et al. (2021) se conoce que el 33% del K y al menos el 15% de N, P, Mg y Ca se lixivian luego de 25 días bajo condiciones de altas precipitaciones. Por lo que estas son consideradas

en los requerimientos para la formación de mazorca que se reponen con el plan de fertilización ajustado.

3.3.1. Requerimiento de fertilizantes del clon EET 800

La Tabla 7 evidencia el plan de fertilización recomendado para reponer los nutrientes exportados por las almendras y así tener producciones esperadas de 1, 2 y 3 toneladas de cacao seco por hectárea. Se especifican las cantidades de fertilizante, como Urea, Fosfato Diamónico (DAP), Muriato de Potasio (MOP), Carbonato de Calcio (CaO_3), Ácido bórico (H_3BO_3), Sulfato de Magnesio (MgSO_4) y Sulfato de Zinc (ZnSO_4) que se deben aplicar en cada caso.

Tabla 7. Requerimientos de fertilizantes del clon EET 800 para producir 1, 2 y 3 ton $\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ de cacao seco

Producción	Fertilizante	IC inferior (95%)	Media	IC superior (95%)
		kg/ha/año		
1 tonelada	Urea	89.8	91.5	93.1
	DAP	22.54	22.86	23.18
	MOP	41.97	42.74	43.52
	CaO_3	5.17	5.26	5.36
	H_3BO_3	0.0271	0.0278	0.0285
	MgSO_4	33.65	34.00	34.36
	ZnSO_4	1.73	2.03	2.32
2 toneladas	Urea	179	182	186
	DAP	45.13	45.78	46.44
	MOP	84.03	85.49	87.05
	CaO_3	10.31	10.49	10.71
	H_3BO_3	0.0543	0.0557	0.0571
3 toneladas	MgSO_4	67.33	67.99	68.75
	ZnSO_4	3.47	4.06	4.64
	Urea	270	274	279
	P_2O_5	67.6	68.6	69.6

K ₂ O	126.0	128.1	130.6
CaO ₃	15.5	15.8	16.1
H ₃ BO ₃	0.0814	0.0835	0.0855
MgSO ₄	100.9	102.0	103.0
ZnSO ₄	5.20	6.09	6.97

Nota: Intervalo de Confianza (IC), Fosfato Diamónico (DAP), Muriato de Potasio (MOP).

En la Tabla 8, se muestra la cantidad de sacos de fertilizante recomendable que sirve como referencia práctica a nivel de campo para agricultores y empresas cacaoteras que estiman una producción de 1,2 y 3 toneladas por hectárea.

Tabla 8. *Requerimiento de fertilizantes por hectárea al año para el clon EET 800.*

Producción	UREA	DAP	MOP	MgSO ₄
	Sacos/ha/año			
1 ton	1-2	1/2	1	1
2 ton	3-4	1	1,5-2	3
3 ton	5,5-6	1	2,5-3	4

Nota: Fosfato Diamónico (DAP), Muriato de Potasio (MOP), Sulfato de magnesio (MgSO₄).

3.4. Costos

El costo total de fertilizantes para la variedad ETT 800 obtenido a partir de la Tabla 8 es de \$141, \$249 y \$437 por hectárea, respectivamente. Estos resultados se compararon con los costos de fertilización del clon CCN-51, Tabla 9, calculados en base a los requerimientos de nutrientes presentados por Vélez (2018).

Tabla 9. *Requerimientos de fertilizantes por hectárea al año para el clon CCN-51*

Fertilizantes	1 tonelada	2 tonelada	3 tonelada
	Sacos/ha		
UREA	1-1.5	3	4.5
MOP	1/4	1/2	1
DAP	1/2	1	1.5
MgSO ₄	3	6	9
Costos (\$)	131.7	263.5	406.7

Al comparar con los precios y cantidad de fertilizante usado entre clones, CCN 51 gastaría \$10, \$14 y \$30 menos que con el valor de inversión de fertilización del clon ETT 800. Sin embargo, se debe resaltar que el clon ETT 800 presenta una madurez fisiológica precoz de 14 meses y un índice de mazorca de 1.4 (INEN, 2018). Ofreciendo mejores o iguales producciones que la variedad CCN 51, con costos accesibles y similares a los calculados entre variedades.

Capítulo 4

4.1. Conclusiones y recomendaciones

4.1.1. Conclusiones

- Se elaboró un modelo de regresión lineal para comparar la producción real y la producción empírica calculada con el factor de conversión. La ecuación mostró una sobrestimación de 50 % más en comparación con el método empírico para pronosticar cosecha, empleado por el Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal. Sin embargo, el modelo evidencia una robusta asociación lineal entre estas dos variables, ya que el coeficiente de correlación es de 0.963 y el R^2 de 0.927 señala que aproximadamente el 92.7% de la variabilidad en la Producción Real puede explicarse por la Producción Empírica. Lo que respalda la capacidad del modelo de explicar y pronosticar la cosecha de un sistema de producción cacaotero.
- Para alcanzar las producciones propuestas se requieren entre dos a seis sacos de Urea, de medio a un saco de DAP, de uno a tres sacos de MOP y de uno a cuatro sacos de $MgSO_4$.
- Los costos de fertilización por hectárea son \$141, \$249 y \$437, respectivamente. En comparación con la variedad CCN-51, se observa un aumento monetario de apenas 7%, 5% y 6% para las mismas producciones. En consecuencia, el clon EET 800 es una alternativa favorable con costos de fertilización accesibles y competitivos. La ausencia de una diferencia significativa en los costos de fertilización entre las variedades ETT 800 y CCN-51 subraya la eficiencia económica del clon ETT 800, consolidándose como una opción valiosa para los productores, respaldada por sus ventajas productivas.

4.1.2. Recomendaciones

- Considerando los resultados del presente proyecto, se recomienda que el ensayo contenga el mismo número de repeticiones por tratamiento de fertilización, ya que tal diferencia provocó que el análisis estadístico concluyera que no había ninguna diferencia significativa entre tratamientos.
- Para fortalecer la robustez de los datos obtenidos, se sugiere incrementar la frecuencia de la toma de parámetros de cacao por parcela. Aumentar la periodicidad permitirá obtener una base de datos más sólida y precisa, que proporcione resultados más ajustados a la realidad.
- Se recomienda complementar los resultados obtenidos de la extracción de nutrientes de las almendras con los análisis de suelo y hoja. Con esto se puede evaluar la disponibilidad de los elementos y el estado nutricional de las plantas para aplicar algún tipo de corrección en el plan de fertilización.
- La metodología aplicada para el diseño de fertilización ajustada puede utilizarse para cualquier variedad de cacao. Esto incluyen los parámetros de mazorcas usados y los análisis estadísticos implicados.

Referencias

- Abad, A., Acuña, C., & Naranjo, E. (2020). El cacao en la Costa ecuatoriana: estudio de su dimensión cultural y económica. *Revista internacional de administración*, 59-83. doi:10.32719/25506641.2020.7.3
- Aguilar, H. (2016). *Manual para la evaluación de la calidad del grano de cacao*. La Lima: Fundación hondureña de investigación agrícola.
- Ahenkorah, Y., Halm, B. J., Appiah, M. R., Akrofi, G. S., & Yirenyki, J. E. (1987). Twenty years' results from a shade and fertilizer trial on Amazon Cocoa (*Theobroma Cacao*) in Ghana. *Experimental Agriculture*, 23(1), 31-39. doi:doi.org/10.1017/s0014479700001101
- Almeida Olivo, A. G. (2023). *Actualidad en la evaluación de la sustentabilidad en fincas cacaoteras (Theobroma cacao L), en el Ecuador*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo.
- Alvarado, C., Morales, F., Carrillo, M., Suárez, A., & Briones, W. (2016). Comparación económica de un sistema de plantación de cacao semitecnificado en dos zonas productoras del Ecuador. *REVISTA CIENCIA E INVESTIGACION*, 13-16.
- Amores, F. (2009). *La investigación en cacao y el desarrollo económico de su cadena de valor*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)-Estación Experimental Boliche.
- Anecacao. (2023). *Informe estadístico mensual de Anecacao*. Anecacao.
- Bridgemohan, P., Singh, K., Cazoe, E., Perry, G., Mohamed, A., & Bridgemohan, R. (2017). Cocoa floral phenology and pollination: Implications for productivity in Caribbean Islands. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 9(7), 106-117. doi:10.5897/JPBCS2016.0598

- Carrión, J. (2012). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de cacao (Theobroma cacao L.) variedad CCN-51, Jama-Manabí*. Quito: UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO.
- Chávez, G., Olaya, R., & Maza, J. (2018). Costo de producción de cacao clonal ccn-51 en la Parroquia Bellamaria, Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(4), 179-185.
- Chepote, R., Santana, S., Araujo, Q., Sodré, G., & Valle, R. (2012). *Aptitud agrícola y fertilidad de suelos para el cultivo de cacao*. Itubana: Centro de Pesquisas do Cacau-CEPEC.
- Cleves, J., Toro, J., & Martínez, L. (2016). Los balances hídricos en modelos de simulación agroclimáticos: Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 149-163.
- Climate Data. (2023). *Climate Data*. Recuperado el 8 de enero de 2024, de Guayaquil climate: Average temperature by month, Guayaquil water temperature: <https://en.climate-data.org/south-america/ecuador/provincia-del-guayas/guayaquil-2962/>
- Compa n a Nacional de Chocolate. (2021). *Modelo Productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.)*. Medellín: Grupo Nutresa.
- Cordero Rojas, M. (2022). *Crecimiento vegetal y parámetros fisiológicos del cultivo de cacao clon EETP 800 en respuesta a la variación de la radiación solar y la fertilización en el sector del Padmi, Zamora Chinchipe*. Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Corporación Financiera Nacional. (2023). *Ficha Sectorial: cultivo de cacao; elaboración de chocolate y productos de chocolate*. Ministerio de Agricultura y Ganadería .
- Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *Revista colombiana de estadística*, 29(1), 57-76.

- CSIC. (2019). *Espectroscopía de emisión atómica ICP-OES*. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica.
- Cuenca, E., Puentes, Y., & Menjívar, J. (2019). Uso eficiente de nutrientes en cacao fino de aroma en la provincia de Los Ríos-Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(3), 8963-8970. doi:doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.74862
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Gonzalez, L., Tablada, E., Díaz, M., Robledo, C., & Balzarini, M. (2005). *Estadística para las Ciencias Agropecuarias* (Sexta Edición ed.). Editorial Brujas.
- FAO. (1973). *Boletín de suelos de la FAO: Legislación sobre fertilizantes*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Organización para las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- Flores Tapia, C., & Flores Cevallos, K. (2021). PRUEBAS PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE DATOS EN PROCESOS PRODUCTIVOS: ANDERSON-DARLING, RYAN-JOINER, SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV. *Revista de Ciencias Sociales y Humanísticas*, 23(2), 83-106. Obtenido de <https://revistas.up.ac.pa/index.php/societas>
- García Guerrero, I. (2023). *Determinantes y características históricas del crecimiento y de los cambios del sistema de producción y exportación del sector cacaotero del Ecuador 2021-2023: Estudio de caso de producción alternativa*. Facultad de Economía. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- González, E. (2014). *Método general por microondas de digestión ácida en matrices ambientales*. Laboratorio de análisis y monitoreo ambiental del centro interdisciplinario de investigaciones y estudios sobre medio ambiente y desarrollo (CIEMAD-IPN).

- Gutiérrez Calva, S. E. (2022). *Respuestas morfológicas y fisiológicas en cacao (Theobroma cacao L.) variedad "EETP 800" bajo tres niveles de nutrición, en la provincia de Zamora Chinchipe – Ecuador*. Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional de Loja.
- Hernández, N., Soto, C., & Caballero, C. (2009). Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales*.
- Herrera Mosquera, H. J. (2018). *Diagnóstico del estado nutricional y recomendaciones de fertilización en cacao CCN-51 en la finca El Capullo, cantón El Triunfo, provincia del Guayas*. Facultad de Ciencias Agrarias. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Hougni, D., Schut, A., Woittiez, L., Vanlauwe, B., & Giller, K. (2021). How nutrient rich are decaying cocoa pod husks? The kinetics of nutrient leaching. *Plant and Soil*, 463, 155-170. doi:doi.org/10.1007/s11104-021-04885-1
- ICA. (1992). *Fertilización en diversos cultivos. Quinta Aproximación*. Tabaitatá: Instituto Colombiano Agropecuario-ICA.
- INEN. (2018). *Granos de cacao. Requisitos. Norma Técnica Ecuatoriana 176. Quita Revisión*. Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN).
- Kozicka, M., Tacconi, F., Horna, D., & Gotor, E. (2018). *Forecasting cocoa yields for 2050*. Rome: Bioversity International. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10568/93236>
- Lamilla Quinde, A. (2022). *Control químico de Monilia (Moniliophthora roreri) en el cultivo de Cacao (Theobroma cacao L.), en Ecuador*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo.
- Lara Avilés, G. (2016). *Diseño de una granja experimental agroproductiva en áreas del campo experimental y enseñanza agropecuaria*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- Leiva Rojas, E. (2012). *Aspectos para la nutrición del Cacao Theobroma cacao L.* Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55148>
- Loor Solórzano, R., Amores Puyutaxi, F., Vasco Medina, S., Quiroz Vera, J., Casanova Mendoza, T., Garzón Catota, A., . . . Zambrano Flores, F. (2019). INIAP-EETP-800 ‘AROMA PICHILINGUE’, NUEVA VARIEDAD ECUATORIANA DE CACAO FINO DE ALTO RENDIMIENTO. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 187-189. doi:10.35196/rfm.2019.2.187-189
- Macías Cepeda, D. J. (2022). *Los micronutrientes y su importancia en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.)*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo.
- Marín Olivares, N. (2016). *Fertilización*. Recuperado el 13 de enero de 2024, de <https://slideplayer.es/slide/5123313/>
- Martínez Moreno, C. A. (2022). *Métodos de pronóstico de cosecha para el cultivo de café Coffea arábica en Colombia. Una revisión bibliográfica*. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente - ECAPMA. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.
- Mendoza, R., & Espinoza, A. (2017). *Guía Técnica para Muestreo de Suelos*. Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services.
- Molina, E. (2007). *Análisis de suelos y su interpretación*. San José: CIA-UCR-Amino Grow International.
- Montoya, E., Arcila, J., Jaramillo, Á., Riaño, N., & Quiroga, F. (2009). *Modelo para simular la producción potencial del cultivo de café en Colombia*. Chinchiná: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café-CENICAFÉ.

- Moreno, L., & Sánchez, J. (1989). *Beneficio del Cacao*. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola.
- Navarro, G., & Navarro, S. (2023). *Fertilización: Química y acción* (2° Edición ed.). Madrid: Ediciones MundiPrensa.
- Newlands, N., Zamar, D., Kouadio, L., Zhang, Y., Chipanshi, A., Potgieter, A., . . . Hill, H. (2014). An integrated, probabilistic model for improved seasonal forecasting of agricultural crop yield under environmental uncertainty. *Frontiers in Environmental Science*, 2. doi:doi.org/10.3389/fenvs.2014.00017
- Niemenak, N., Rohsius, C., Cilas, C., Bleiholder, H., Meier, U., & Lieberei, R. (2010). Phenological growth stages of cacao plants (*Theobroma* sp.): Codification and description according to the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 156(1), 13-24. doi:10.1111/j.1744-7348.2009.00356.x
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición Especial*. Organización de las Naciones Unidas (ONU).
- Pari Pariona, C. (2011). *Fertilización con nitrógeno y potasio en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) clon ICS 95 en Cubantia-Pangoa*. Satipo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Pino, S. (2019). VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CAMBIO DE VARIEDAD DE CACAO EN PARCELAS DE PRODUCTORES DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI-ECUADOR. *Revista Científica ECOCIENCIA*, 6(4), 1390-9320.
- Pinto Rodríguez, R. R. (2019). *La gestión de las microempresas del cacao y sus efectos en el comportamiento de las exportaciones en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas-Ecuador*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Poma Ube, J. F. (2023). *Determinación de la calidad productiva de fincas de cacao Theobroma cacao) en sistemas agroforestales en la zona de Ricaurte, Ecuador*. Escuela de

- Agricultura, Silvicultura, Pesca y Veterinaria. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo.
- Puertas Marín, A., & Falla Ramírez, Y. (2018). *DISEÑO DE UN MODELO PARA LA PLANIFICACIÓN DE COSECHA Y DISTRIBUCIÓN DE UNA CADENA DE ABASTECIMIENTO FRUTÍCOLA DEL CENTRO DEL VALLE DEL CAUCA*. Zarzal: Universidad del Valle.
- Quintero, M., & Díaz, K. (2004). El mercado mundial del cacao. *Agroalimentaria*, 9(18), 47-59.
- Rainforest Alliance. (2021). *Guía G: Estimación del rendimiento*. Rainforest Alliance.
- Ramos Giraldo, P. J. (2017). *Desarrollo de un sistema automático de medición de la masa de café en rama a través de visión de máquina*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, P. (2019). “*Estudio de la fertilización edáfica en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en la hacienda San José, cantón Babahoyo*”. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo.
- Romero, N. (1997). Métodos de análisis para la determinación de nitrógeno y constituyentes nitrogenados en alimentos. En C. Morón, I. Zacarías, & S. de Pablo, *PRODUCCIÓN Y MANEJO DE DATOS DE COMPOSICION QUÍMICA DE ALIMENTOS EN NUTRICIÓN*. Santiago: ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION.
- Salcedo, C., Rodríguez, M., & Mejía, J. (1988). *Cálculo y estimación de cosechas*. Zapopan: Universidad de Guadalajara.
- Sánchez, F., Medina, S., Díaz, G., Ramos, R., Vera, J., Vásquez, V., . . . Onofre, R. (2015). Potencial sanitario y productivo de 12 clones de cacao en Ecuador. *Revista fitotecnia mexicana*, 38(3).

- Sukiyono, K., Nabiu, M., Sumantri, B., Novanda, R., Arianti, N., Sriyoto, . . . Mustamam, H. (2018). Selecting an Accurate Cacao Price Forecasting Model. *Journal of Physics: Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1114/1/012116
- Sun, F., Meng, X., Zhang, Y., Wang, Y., Jiang, H., & Liu, P. (2023). Agricultural Product Price Forecasting Methods: A Review. *Agriculture*, 13(9), 1671. doi:doi.org/10.3390/agriculture13091671
- Thompson, L., & Troeh, F. (1892). *Soil and Fertility* (4^o Edición ed.). New York: Mc Graw-Book Company.
- Valdez Paucar, M. L. (2022). *Evaluación de tres niveles de fertilización y su influencia en el crecimiento vegetativo en Cacao (Theobroma cacao L.) clon EETP 800, en La Estación Experimental El Padmi, Zamora Chinchipe*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Van Vliet, J. A., & Giller, K. E. (2017). Mineral nutrition of cocoa. En D. L. Sparks, *Advances in Agronomy* (1er edición ed., págs. 185-270). Academic Press. doi:doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.017
- van Vliet, J. A., Slingerland, M., & Giller, K. E. (2015). *Mineral Nutrition of Cocoa. A Review*. Wageningen: Wageningen University and Research Centre.
- Vélez Ruiz, J. (2018). *Evaluación de la respuesta de cacao CCN-51 a plena exposición solar a las aplicaciones de Azufre (S) y Magnesio (Mg) en la zona de Zapotal, Provincia de Los Ríos*. Quevedo: UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO.
- Zavala Solórzano, J. W. (5 de enero de 2008). UNAS. Obtenido de Nutrición mineral del cacao: <https://diplomado2007unas.blogspot.com/2008/>
- Zuidema, P., Leffelaar, P., Gerritsma, W., Mommer, L., & Anten, N. (2005). A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agricultural Systems*, 195-225. doi:10.1016/j.agsy.2004.06.015