



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

## TESIS DE GRADO

**Evaluación de compatibilidad genética de accesiones de cacao (*Theobroma cacao* L.), municipio del Cuá, departamento de Jinotega, periodo de septiembre - noviembre del año 2025**

López, A; Avila, M; Rivera, D.

### **Tutor(a)**

Ph.D. Óscar Enrique Bustamante Morales

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DE ESTELÍ

*¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!*



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

**Centro Universitario Regional de Estelí  
CUR-Estelí**

Recinto Universitario “Leonel Rugama Rugama”  
Departamento de Ciencias Tecnológicas y Salud

**Evaluación de compatibilidad genética de accesiones de  
cacao (*Theobroma cacao* L.), municipio del Cuá,  
departamento de Jinotega, periodo de septiembre -  
noviembre del año 2025**

Trabajo de investigación para optar al grado de  
Ingeniero agrónomo

**Autores**

Axl Xhanders López Colindres  
Máximo Asael Ávila Talavera  
Hiufred David Rivera Hernández

**Tutor**

Ph.D. Oscar Enrique Bustamante Morales

Septiembre, 2025





## **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo con profunda gratitud a nuestras familias, padres, abuelos, hermanos, parejas. La dedicamos a nosotros mismos por saber qué tan lejos hemos llegado. Este logro es tanto de nosotros como de las personas que nos han apoyado en cada paso por la confianza y sacrificio.

A nuestros padres, por enseñarnos el valor del esfuerzo, la honestidad y la perseverancia. A ellos les debemos cada oportunidad, cada sueño cumplido y la convicción de que el trabajo honesto siempre da frutos. A nuestros hermanos y seres queridos, gracias por sus palabras de aliento, por la compañía y por ser luz en nuestro camino.

Y finalmente, dedicamos esta tesis a quienes buscan crecer, aprender y superarse cada día. Este trabajo es un homenaje a la disciplina, a los sueños y a la esperanza de seguir construyendo un futuro mejor

## **Agradecimiento**

Agradecemos primeramente a Dios, que es nuestra fuente de fortaleza, sabiduría y guía en cada momentos y etapas de nuestras vidas. Su presencia nos ha permitido avanzar con gran determinación, superar desafíos y finalizar esta investigación con gratitud y humildad.

También recalcar el apoyo de nuestros padres, que siempre son una inspiración y siempre nos han estado ayudando en todo, aunque sea un ayuda silencioso siempre están presentes.

A nuestros maestros que nos han enseñado durante todo este trayecto universitario y forjarnos como profesionales, a nuestros tutores para hacer una tesis a la altura de unos ingenieros y a la universidad por darnos la oportunidad de haber estudiado con misión y visión de profesionales.

Agradecemos también a todas las personas, instituciones y colaboradores que brindaron su apoyo para la realización de este estudio: quienes facilitaron el material, el espacio de trabajo, la información técnica y cualquier recurso necesario para la ejecución de esta investigación. Cada contribución, por pequeña que pareciera, tuvo un impacto significativo en este proyecto.

Finalmente, agradecemos a nuestros compañeros de estudio y amistades por su compañía, ánimo y solidaridad. Su presencia hizo este camino más llevadero y enriquecedor. A todos, gracias por ser parte de este logro.



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL, ESTELÍ  
“2025: Eficiencia y Calidad para seguir en victorias”  
Departamento de Ciencias de la Educación y Humanidades

### Carta aval del tutor

Estelí, 5 diciembre 2025

Por medio de la presente, en calidad de tutor(a) del trabajo de modalidad de graduación titulado: **Evaluación de compatibilidad genética de accesiones de cacao (*Theobroma cacao* L.), municipio del Cuá, departamento de Jinotega, periodo de septiembre - noviembre del año 2025**, elaborado por el(la)/los(as) estudiante(s):

Axl Xhanders López Colindres	21511434
Máximo Asael Avila Talavera	21512941
Hiufred David Rivera Hernández	21506418

Estudiantes de la carrera de **ingeniería agronómica**, hago constar que he brindado acompañamiento académico y metodológico durante el desarrollo de dicho trabajo, cumpliendo con lo establecido en el cronograma y en la normativa institucional vigente. Asimismo, avalo que el trabajo cumple con los requisitos formales, científicos y éticos exigidos por la Universidad, en cumplimiento de la modalidad de graduación correspondiente.

Atentamente,

Ph.D. Oscar Enrique Bustamante Morales

Orcid:

UNAN-Managua/CUR-Estelí

CC/

## Resumen

Esta investigación evaluó la compatibilidad genética a niveles de auto e inter compatibilidad de tres accesiones de cacao (*Theobroma cacao L.*) tolerantes a moniliasis (*Moniliophthora roreri*) en el municipio de El Cuá, Jinotega, durante el periodo agosto–noviembre de 2025. La investigación se desarrolló bajo un DCA para autopolinización y un BCA para polinizaciones cruzadas, utilizando la polinización manual controlada. Se analizó el comportamiento reproductivo mediante el porcentaje de prendimiento y cuajamiento de flores en días 3, 7 y 15, Los resultados mostraron diferencias significativas entre accesiones ( $p < 0.05$ ) en los niveles de autocompatibilidad: la accesión INTA RSJ 03-16 presentó autocompatibilidad completa con 100% de prendimiento, mientras que INTA RSJ 01-16 e INTA RSJ 02-16 mostraron autoincompatibilidad parcial. Los resultados de Inter compatibilidad, las combinaciones cruzadas alcanzamos altos niveles de fecundación ( $\geq 80\%$ ), sin diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0.05$ ). Estos resultados confirman la existencia de compatibilidad genética entre las tres accesiones, lo que favorece su uso en programas de mejoramiento genético, establecimiento de huertos semilleros y plantaciones. Se recomienda emplear la accesión INTA RSJ 03-16 en plantaciones homogéneas y promover combinaciones cruzadas para aumentar la diversidad genética y la productividad. Este estudio aporta información relevante para el manejo reproductivo y la sostenibilidad en accesiones que poseen resistencia a la moniliasis en del cultivo de cacao en Nicaragua.

**Palabras clave:** cacao, accesiones, moniliasis, autocompatibilidad, polinización, autopolinización, intercompatibilidad.

## **Abstract**

This study evaluated the genetic compatibility at auto- and inter-compatibility levels of three cocoa accessions (*Theobroma cacao* L.) tolerant to moniliasis (*Moniliophthora roreri*) in the municipality of El Cuá, Jinotega, during the period August–November 2025. The research was conducted under a DCA for self-pollination and a BCA for cross-pollination, using controlled manual pollination. Reproductive behavior was analyzed by the percentage of flower setting and fruit set on days 3, 7, and 15. The results showed significant differences between accessions ( $p < 0.05$ ) in self-compatibility levels: accession INTA RSJ 03-16 showed complete self-compatibility with 100% setting, while INTA RSJ 01-16 and INTA RSJ 02-16 showed partial self-incompatibility. The results of intercompatibility, the cross combinations obtained high levels of fertilization ( $\geq 80\%$ ), with no significant differences between treatments ( $p > 0.05$ ). These results confirm the existence of genetic compatibility between the three accessions, which favors their use in genetic improvement programs, establishment of seed orchards, and plantations. It is recommended to use the INTA RSJ 03-16 accession in homogeneous plantations and to promote cross combinations to increase genetic diversity and productivity. This study provides relevant information for reproductive management and sustainability in accessions that are resistant to moniliasis in cocoa cultivation in Nicaragua.

**Keywords:** cocoa, accessions, moniliasis, self-compatibility, pollination, self-pollination, intercompatibility.

## Índice

1.	Introducción.....	1
2.	Antecedentes.....	3
3.	Planteamiento del problema .....	6
4.	Justificación.....	7
5.	Objetivos de investigación .....	8
5.1.	Objetivo general .....	8
5.2.	Objetivos específicos.....	8
6.	Limitaciones del estudio .....	9
7.	Hipótesis .....	10
8.	Operalización de variables.....	11
9.	Marco Teórico.....	12
Tabla 1.	Taxonomía del Theobroma cacao L.....	14
10.	Diseño metodológico .....	19
10.1.	Tipo de investigación .....	19
10.2.	Población y selección de la muestra.....	20
10.3.	Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos .....	20
Tabla 1.	Polinización Cruzada en tres variedades .....	21
<b>Tabla 2.</b>	<b><i>Autopolinización en tres tipos de variedades</i></b> .....	21
10.4.	Confiability y validez de los instrumentos.....	22
10.5.	Técnicas, instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos	22
11.	Análisis y discusión de resultados .....	24
11.1.	Autocompatibilidad.....	24
Tabla 3.	Tabla de números de flores tratadas, polinizadas y porcentaje de prendimiento en autocompatibilidad.....	25
Figura 1.	Figura de Prendimiento de auto-compatibles.....	25
11.2.	Intercompatibilidad .....	26
Tabla 4.	Porcentaje inter-compatibles.....	26

Figura 2. Porcentaje de prendimiento a los 3, 7 y 15 días de cruce inter-compatibles.....	27
.....	27
11.3. Dinámica temporal del prendimiento (3–7–15 días).....	27
<b>11.3.1 Día 3 – Compatibilidad genética</b> .....	27
<b>11.3.2 Día 7 – Estabilización reproductiva</b> .....	27
<b>11.3.3 Día 15 – Fecundación efectiva</b> .....	28
11.4. Comparación entre auto e intercompatibilidad.....	28
11.5. Implicaciones para manejo y mejoramiento genético .....	29
11.6. Discusión general .....	29
12. Conclusiones .....	31
13. Recomendaciones.....	32
14. Referencias .....	33
15. Anexos .....	35

## Índice de tablas

Tabla 1.	Taxonomía del Theobroma cacao L. ....	14
Tabla 1.	Polinización Cruzada en tres variedades .....	21
Tabla 3.	Tabla de números de flores tratadas, polinizadas y porcentaje de prendimiento en autocompatibilidad.....	25
Tabla 4.	Porcentaje inter-compatibles. ....	26

## Índice de figuras

Figura 1.	Prendimiento de auto-compatibles .....	25
Figura 2.	Porcentaje de prendimiento a los 3, 7 y 15 días de cruce inter-compatibles....	27

## 1. Introducción

En Nicaragua el cultivo del cacao es de suma relevancia, se cultivan aproximadamente 22,500 manzanas de cacao, de las cual el 54% se encuentra en manos de pequeños productores, generando más de 23,000 empleos directos en el campo, con una producción total de 152,900 quintales, de los cuales el 67% se exportan a los mercados de Europa, Centroamérica y Estados Unidos, aportando a la economía nacional 7 millones de dólares en exportaciones. (INTA, 2023). El cacao nicaragüense es reconocido a nivel internacional como un grano fino de alta calidad, aroma y sabor, el cual lo ha posicionado en los mercados para la industria del chocolate, gracias a su ubicación geográfica. Este cultivo representa una fuente de ingresos importante tanto para productores como para exportadores.

De acuerdo al monitoreo efectuado por el Ministerio Agropecuario, MAG, las familias productoras de cacao esperan una cosecha de 213,000 quintales oro, correspondiente al ciclo productivo 2024/2025 (MAG), 2024-2025).

Sin embargo, pese su aporte económico y su valor internacional la productividad en nicaragua enfrenta importantes limitaciones. Entre las principales se encuentran problemas de incompatibilidad floral asociados a la variabilidad genética de los árboles y a la presencia de enfermedades como la moniliasis. Estos factores influyen directamente en el cuajado de frutos y reducen el rendimiento en campo.

El estudio de accesiones o clones que posean características fundamentales como alta tolerancia a la moniliasis y una buena producción es fundamental para la el establecimiento de plantaciones, creación de semilleros garantizando la mejor genética para la producción en Nicaragua.

Por tan este estudio es de suma relevancia frente a estas problemáticas como son la poca información sobre los niveles de auto he inter compatibilidad en accesiones de cacao tolerantes a la moniliasis. La in compatibilidad fue reportada por primera vez por Pound en 1932, quien verificó la ocurrencia de cambios de autoincompatibilidad a auto compatibilidad durante ciertos períodos del año; es así como se considera que el sistema de incompatibilidad

en el cacao no es simple, ya que incluye diferentes grados de incompatibilidad. Citado por (Ríos-Moyano2, 2023).

La compatibilidad floral en cacao puede presentarse en forma de auto-compatibilidad —que favorece la producción en plantaciones homogéneas— o de incompatibilidad parcial o total, que requiere polinización cruzada entre diferentes accesiones (JAK N'Goran, 1994). Entre las causas que influyen en el cuajado de flores se encuentran la viabilidad del polen, la compatibilidad genética, las condiciones ambientales y la técnica utilizada para la polinización (Arellano Escudero, 2020). Evaluar estos factores permite optimizar la selección y el manejo de materiales genéticos, mejorando la productividad y resiliencia del cultivo frente a enfermedades.

Según (Mendoza Sánchez, 2015) la polinización manual es un método en el que se utilizan flores donadoras y receptoras. Consiste en la eliminación mecánica de los estaminoides con una pinza, dejando libre el pistilo donde se va a frotar el polen de las anteras donadoras. Se colocan tubos plásticos en las flores para protegerlas durante su apertura, asegurando así el aislamiento de agentes polinizadores o contaminación después de la polinización manual.

Por otro lado, (Maroto, 2016) menciona que la polinización manual se realiza con diversos, propósitos, como determinar la autocompatibilidad e intercompatibilidad de las flores, compensar la falta de agentes polinizadores en ciertas áreas agrícolas, preservar las características específicas de los árboles, mejorar genéticamente los materiales y producir semillas de alta calidad.

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito evaluar la compatibilidad floral de tres accesiones de cacao tolerantes a moniliasis, en el municipio de El Cuá, Jinotega, durante el periodo agosto-noviembre 2025. El documento incluye:

- La identificación de accesiones auto-compatibles.
- La identificación de la compatibilidad cruzada entre las accesiones estudiadas.
- El cálculo del porcentaje de fecundación comparando auto-compatibilidad e intercompatibilidad.

## 2. Antecedentes

### Internacionales

1. La (International Cocoa Organization (ICCO), 2004) desarrollo un proyecto internacional dedicado a la conservación y uso del germoplasma de cacao, mediante las evaluaciones de accesiones provenientes de diferentes centros de diversidad. Esto incluyó análisis de productividad, resistencia a enfermedades, y la calidad física y química del grano, además de caracterizaciones morfológicas y moleculares. Gracias a estas acciones, se lograron identificar materiales con un alto potencial genético y se organizaron ensayos que mostraron patrones de compatibilidad, divergencia genética y un comportamiento agronómico diferente bajo diversas condiciones ambientales. Estos trabajos forman uno de los precedentes más sólidos sobre la necesidad de comprender la compatibilidad floral en programas de mejoramiento.
2. En Ecuador, (Arellano Escudero, 2020) evaluó la autocompatibilidad e intercompatibilidad del cacao nacional el Centenario (*Theobroma cacao L.*) en la estación experimental Litoral Sur del INIAP. El propósito de la investigación fue averiguar cómo se comporta este clon en términos de autocompatibilidad e intercompatibilidad. Se realizaron polinizaciones manuales controladas y se llevó a cabo un análisis estadístico del prendimiento floral. Los resultados resaltan la importancia de combinar estudios morfológicos con un análisis reproductivo para así mejorar la selección de materiales.
3. De manera similar en Perú, (Vargas Matute, 2022) realizó evaluaciones de la compatibilidad e intercompatibilidad de cuatro clones prometedores del *Theobroma cacao L.* con el objetivo de crear cultivares policlonales. La muestra estuvo integrada por árboles de distintas accesiones, todos ellos maduros. Hizo uso de análisis estadístico y polinizaciones cruzadas. Determina que algunas combinaciones tienen una elevada compatibilidad, lo cual propicia que se utilicen en programas de mejoramiento genético y arreglos clonales para mejorar la productividad.

## Nacionales

1. En Nicaragua, el INTA (2023), señala que una de las principales limitantes para el incremento de la productividad de cacao es la incompatibilidad genética entre clones. Lo cual con estas limitantes afecta la producción nacional. Asimismo, el INTA asegura que la baja productividad se debe en parte a la ausencia de información sobre el comportamiento reproductivo de muchos materiales usados por los productores.
2. Según (Ríos-Moyano<sup>2</sup>, 2023) reportó factores asociados a la polinización del cacao en la región mesoamericana, destacando la influencia de la variabilidad genética en la compatibilidad floral. El estudio incluyó la observación de fincas cacaoteras y la aplicación de técnicas de polinización manual. Se concluyó que la autoincompatibilidad y los bajos niveles de cruzamiento entre ciertos clones afectan de manera significativa la producción anual.
3. Por su parte, (David Alvarado G. Julio Pérez, 2017), en su Manual de Polinizaciones Controladas en Cacao, empleado en diferentes zonas productoras de Nicaragua. Este documento establece procedimientos técnicos para la identificación, aislamiento y polinización manual de flores, con el fin de mejorar el cuajamiento y la producción de cacao. Entre sus resultados, se destaca que la polinización controlada incrementa la tasa de fecundación en clones compatibles, contribuyendo a elevar la productividad.

## **Locales**

1. En parcelas de investigación del CUR-Estelí, se han implementado ensayos de polinización controlada en clones tolerantes a moniliasis para determinar su compatibilidad floral. Estos estudios, realizados en colaboración con productores locales, han permitido identificar accesiones con mayor porcentaje de prendimiento, contribuyendo a la mejora de la producción en fincas familiares.
2. En Nueva Segovia, productores capacitados por técnicos del INTA han participado en la evaluación de la compatibilidad cruzada de clones de cacao bajo condiciones de campo. Las pruebas demostraron que algunas combinaciones presentan alta intercompatibilidad, lo que sugiere su potencial para programas de clonación y propagación en la región.
3. En Matriz, investigaciones coordinadas por el CUR-Estelí y agricultores locales han documentado la incidencia de incompatibilidad en clones establecidos hace más de cinco años. Utilizando polinizaciones manuales y registros sistemáticos, se encontró que ciertas accesiones presentan baja autocompatibilidad, confirmando la necesidad de introducir material genético compatible para elevar la producción.

### 3. Planteamiento del problema

Tomando en cuenta que la moniliasis se encuentra entre las principales amenazas fitosanitarias, provocada por (*Moniliophthora roreri*) que ataca directamente a la mazorca del cacao y llega a ocasionar pérdidas desde el 16% hasta mayores del 80% según la región y tipo de manejo. En Nicaragua la monil ha sido catalogada como la de mayor impacto para el cultivo del cacao. (IPSA, 2018)

En el departamento de Jinotega algunas de las principales limitantes asociadas a la enfermedad son que a pesar del mucho esfuerzo que han realizado en la identificación de materiales tolerantes a moniliasis aun en nuestro país son limitado los estudios en la identificación de materiales regionales con tolerancia a la enfermedad y la precisión de la capacidad de autofecundación y la eficiencia en la fecundación cruzada de muchas de estas accesiones.

El (INTA, 2016) nicaragua en el año 2016 realizo una recolecta e identificación a nivel molecular a accesiones que poseen tolerancia a moniliasis, determinando 3 materiales tolerantes a la enfermedad los cuales se establecieron a nivel de campos para ser evaluado en campo, pero una de las limitantes es que no se conoce la compatibilidad de los materiales.

La ausencia de esta información limita el establecimiento de plantaciones con bases genéticas sólidas, lo que repercute en bajos índices de cuajado, menor producción de mazorcas y pérdidas económicas para los productores (Enríquez & Soria, 2019). Asimismo, la falta de estudios locales sobre compatibilidad floral dificulta la planificación de huertos semilleros que garanticen una adecuada oferta de polen y la obtención de semillas de calidad.

En este contexto, surge la necesidad de evaluar la compatibilidad genética a nivel floral de dichas accesiones tolerantes a moniliasis en condiciones específicas del municipio de El Cuá. Identificar materiales auto-compatibles e inter-compatibles permitirá establecer estrategias de manejo reproductivo que favorezcan la productividad, la resiliencia frente a la enfermedad de la moniliasis y la sostenibilidad del cultivo de cacao en la región.

#### 4. Justificación

La elaboración de esta investigación es fundamental por que determinara el porcentaje de compatibilidad de cacao de tres accesiones de (*Theobroma cacao L*) en arboles de una edad de 6 años resistentes a la moniliasis, los cuales están presentando bajo rendimiento, es necesario determinar si la baja productividad se debe a incompatibilidad de estas accesiones en estudio. Esta información será muy importante en el campo de la investigación, para futuros mejoramientos genéticos, arreglos clónales y determinar niveles de productividad.

El cacao (*Theobroma cacao L.*) es uno de los cultivos más importantes para la economía y la seguridad alimentaria de las regiones productoras. Nicaragua es uno de los 16 países del mundo que produce y exporta cacao orgánico y entra en el 50-70 % de la producción que se exporta, se estima para 2026 una producción de 25,500 toneladas (Lacambra, 2020).

La autoincompatibilidad impide que la mayoría de las plantas de cacao genéticamente idénticas (clones) fecunden sus propias flores y produzcan frutos con éxito (Knight, 1955). La incompatibilidad ocurre en el ovario. El tubo polínico se desarrolla, pero los gametos no se fusionan, lo que provoca la abscisión de la flor (Cope, 1962)

La moniliasis (*Moniliophthora roreri*) es la enfermedad más limitante del cacao en Centroamérica, provocando pérdidas enormes que varían entre el 30% y el 90% de la producción (Phillips Mora, 2009). Es fundamental evaluar las accesiones que son resistentes a esta enfermedad para asegurar la resiliencia de los sistemas de producción, también es imprescindible conocer en términos de compatibilidad floral y fecundación efectiva.

La realización de este estudio sobre la compatibilidad genética en el municipio de el Cua, Jinotega, permitiendo identificar los niveles de auto-compatibilidad y niveles de intercompatibilidad en accesiones de cacao resistentes a moniliasis. Esta información es crucial para el diseño de huertos semilleros, programas de mejora genética (Lanaud C, 2017). Estos estudios también ayudan a la diversificación genética de los cacaotales y a la sostenibilidad de la cadena de valor del cacao fino de aroma, un producto con alto potencial de exportación para Nicaragua.

## **5. Objetivos de investigación**

### **5.1. Objetivo general**

Evaluar la compatibilidad a nivel floral de tres accesiones de cacao (*Theobroma cacao* L.), tolerante a moniliasis (*Moniliophthora roreri*), en el municipio del Cua departamento de Jinotega VI región.

### **5.2. Objetivos específicos**

Identificar las accesiones de cacao que muestren ser auto compatibles entre las accesiones tolerante a moniliasis.

Valor la compatibilidad cruzada entre las accesiones tolerante a moniliasis.

Determinar el porcentaje de fecundación entre auto compatibilidad e intercompatibilidad entre las accesiones tolerante a moniliasis

## **6. Limitaciones del estudio**

Las limitaciones del estudio se basan en efectos climáticos adversos, al haber un mal tiempo no se puede realizar el procedimiento, otra de las limitantes es la técnica en si ya que la polinización manual depende de la habilidad de los investigadores y el error humano puede afectar en el porcentaje de fecundación.

## 7. Hipótesis

Hipótesis de investigación:

**Ho:**

“No existen diferencias significativas en los niveles de autocompatibilidad e intercompatibilidad entre las tres accesiones de cacao (INTA RSJ 01-16, INTA RSJ 02-16 e INTA RSJ 03-16); por lo tanto, los cuajamientos son estadísticamente iguales.”

**Hi:**

“Existen diferencias significativas en los niveles de autocompatibilidad e intercompatibilidad entre las tres accesiones de cacao (INTA RSJ 01-16, INTA RSJ 02-16 e INTA RSJ 03-16); por tanto, los porcentajes de prendimiento y cuajamientos varían entre accesiones.”

## 8. Operalización de variables

Objetivos específicos	Variable	Subvariable, dimensiones	Variable operativa o indicador	Tipo de variable	Categorías estadísticas	Instrumentos para recolección de datos
Identificar las accesiones de cacao que muestren ser auto compatibles	Número de flores polinizadas	Total de flores manipuladas en el proceso	Conteo de flores al momento de la polinización	Cuantitativa	NFT (número total)	Hoja de campo
Determinar la compatibilidad cruzada	Número de flores prendidas	Flores que muestran cuajamiento inicial	Conteo a los 3 días	Cuantitativa	% de prendimiento	Hoja de campo
Determinar el porcentaje de fecundación entre auto compatibilidad e intercompatibilidad entre las accesiones tolerante a moniliasis	Cuajamiento de frutos	Desarrollo progresivo del ovario fecundado	Evaluación a los 7, 15 y 30 días	Cuantitativa	% de cuajamiento	Registros fotográficos y hoja de campo
	Compatibilidad	Capacidad de accesión de producir frutos viables	Análisis de datos de autopolinización y cruzamientos	Cuantitativa	Compatible / Incompatible	Matriz de compatibilidad

## 9. Marco Teórico

El cacao (*Theobroma cacao*) es un árbol tropical de hoja perenne cultivado por sus semillas comestibles. Es originario de las selvas bajas de las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco.

Para los Mayas y los aztecas el cacao representaba mucho más que un alimento. Estas culturas milenarias lo utilizaban para preparar bebidas, como moneda de intercambio, y como símbolo de abundancia. Pero no solo las antiguas civilizaciones hacían uso del cacao. A través de la agricultura familiar los pobladores de Tabasco unen las raíces del pasado con el presente. (Works, National Geographic Creative, 2023)

El xocoatl fue una bebida hecha por los mayas, según algunas historias, esta bebida estaba dedicada a los dioses. El nombre científico del cacao, *Theobroma cacao*, significa “aliento de los dioses” en griego. La bebida también era común que se la dieran a guerreros antes de cualquier batalla.

Además, para los mayas y los aztecas el cacao tenía valor de moneda. Era tan valioso que podría compararse con el oro. Paralelamente, los actuales productores cuentan que el cacao se vende muy rápido y que tener una parcela de cacao es como tener un cajero automático. De hecho, cuando venden su producción, los cacaoticultores suelen decir: “*Ya cayó el cacaíto*” (el dinero que perciben por la venta del cacao). (Works, National Geographic Creative, 2023)

El cacao se obtiene de un pequeño árbol que solo crece en zonas tropicales, y es un fruto que se presenta en forma de grano. Como toda planta, tiene muchas variedades que afectan sus propiedades y hacen que los sabores y aromas varíen según la variedad.

El cacao tiene su origen en la cuenca amazónica y cuenta con más de 4,000 años de historia. Aunque los Olmecas fueron los pioneros en cultivarlo, luego lo apreciaron mucho tanto los Mayas como los Aztecas. Los Aztecas utilizaban los granos de cacao como moneda, mientras que los Mayas elaboraban una bebida conocida como "xocoatl" con cacao, agua y especias. (Carvallo, 2020)

Los tipos de cacao criollo, que proceden de América del Sur y Central, son valorados por su sabor suave, pero no son fáciles de cultivar. El cacao forastero, originario de la cuenca amazónica, es más fuerte y constituye la mayor parte de la producción global. El cacao trinitario, que apareció en el siglo XVIII en Trinidad, es un híbrido que mezcla la fortaleza del forastero y el gusto del criollo. Estos tres tipos de cacao han influido en el desarrollo del chocolate que consumimos actualmente. (Carvallo, 2020)

El cacao está dividido en tres grupos genéticos: Criollo, Forastero y Trinitario.

### **Criollos**

Se distingue por tener una menor producción de frutos y representar un porcentaje reducido de la producción mundial, pero es el árbol que genera la fruta de mejor calidad. Se caracteriza por tener semillas redondas y un poco planas. Sin fermentar, tienen un color blanco y violeta tenue. (Carvallo, 2020)

De los tipos de cacao es el que posee aromas frutales con toques de frutos secos y un ligero sabor amargo, aunque elegante. Es muy valorado para los chocolates de mejor calidad. Con esta variedad, se elaboran algunos de los más exquisitos bombones y cualquier tipo de preparación gourmet.

En México, Nicaragua y Guatemala se cultivan estos tipos de cacao, Nicaragua en cantidades reducidas. Venezuela, Colombia, las islas del Caribe (Jamaica e Isla de Granada), Trinidad y Tobago. En Madagascar, Java y las islas Comores. (Carvallo, 2020)

### **Forastero**

La variedad más común es la amazónica o forastero, que tiene un sabor fuerte, amargo y ligeramente ácido. Este tipo de cacao representa el 70 % del consumo global. Es la más resistente (los productores afirman que confían en su capacidad para resistir enfermedades) y, además, produce más frutos. Pero la desventaja es su aroma sin fineza y poco sabor frutal.

Esta variedad fue traído por los Europeos en los territorios colonizados cuando el chocolate era de principal importancia a principios del siglo XX en Europa.

Este tipo de cacao se cultiva mayormente en Venezuela, Ecuador, Perú, Ghana, Camerún, Costa de Marfil, Brasil, Colombia, Santo Tomé, Costa Rica, y algunas plantaciones en el sureste asiático. (Carvalho, 2020)

### **Trinitario**

Es un tipo de cacao híbrido obtenido a partir del Criollo y el Forastero. Su producción es claramente superior en comparación con el criollo y adoptando las características gustativas de ambos. Es mucho más resistente a enfermedades y tiene un sabor mucho más sutil.

Incluye una extensa variedad de sabores, olores y persistencias en el paladar. Se pueden degustar sabores de heno, melón, miel y manzana. Se cultiva en Venezuela, Camerún, Papúa-Nueva Guinea, Sri Lanka, Java, Trinidad. Con el nombre de Carenero Superior. Hoy en día representa cerca del 5% de la producción total de todas las variedades de cacao. (Carvalho, 2020)

**Tabla 1. Taxonomía del *Theobroma cacao* L.**

<b>Clasificación taxonómica</b>	
<b>Reino:</b>	<i>Plantae</i>
<b>Subreino:</b>	<i>Tracheobionta</i>
<b>Orden:</b>	<i>Malvales</i>
<b>Familia:</b>	<i>Malvaceae</i>
<b>Género:</b>	<i>Theobroma</i>
<b>Especie:</b>	<i>T. cacao</i>

## **Origen y morfología**

**Origen:** Trópicos húmedos de América, noroeste de América del Sur, zona amazónica.

### **Planta**

Árbol de tamaño mediano (5-8 m) aunque puede alcanzar alturas de hasta 20 m cuando crece libre bajo una sombra intensa. Su corona es densa, redonda y con un diámetro de 7 a 9 m. Tronco recto que se puede desarrollar en formas muy variadas.

**Sistema radicular:** Raíz principal pivotante y cuenta con muchas secundarias, de las cuales la mayoría se encuentra en los primeros 30 cm del suelo.

**Hojas:** Simples, enteras y de color verde bastante variable (color café claro, morado o rojizo, verde pálido) y de peciolo corto. (INFOAGRO, 2015)

### **Fruto**

Su tamaño, color y formas varían, pero por lo general son bayas que miden 30 cm de largo y 10 cm de diámetro. Estas pueden ser lisas o con costillas, elípticas y de color rojo, amarillo, morado o marrón. La pared del fruto tiene una consistencia similar a la del cuero y es gruesa, dura o suave. Los frutos están divididos internamente en cinco celdas. La pulpa tiene un sabor que va de ácido a dulce y es aromática, además puede ser blanca, rosada o marrón. En cada baya se encuentran entre 20 y 40 semillas, que son planas o redondas, de color morado, blanco o café, y tienen un sabor amargo o dulce.

### **Flores**

Son de tamaño pequeño y se generan, como los frutos, en pequeños racimos sobre el tejido maduro del tronco y las ramas que tienen más de un año, alrededor de donde antes existieron hojas. Las flores son pequeñas, se abren por las tardes y pueden ser fecundadas durante el día siguiente en su totalidad. La corola tiene un color que puede ser blanco, rosa o amarillo; el cáliz es de color rosado y tiene segmentos puntiagudos. Los pétalos tienen longitud. La

polinización es entomófila, destacando un pequeño insecto de la familia (*Forcipomya*). (INFOAGRO, 2015)

### **Biología de la flor**

El caco tiene un tipo de inflorescencia la cual es cauliflora en el cual las flores aparecen sobre la corteza vieja, bien sea en el tronco; Esto hace más fácil la instalación de un tubo protector para regular la polinización manual o artificial, ya sea en las ramas principales o en las secundarias.

La flor, que es de tamaño pequeño y generalmente pentámera, está sostenida por un pedicelo que mide entre 1 y 3 cm. Los cinco pétalos, que están conectados por su base, son de color blanco o rosa. Los cinco pétalos, intercalados con los sépalos, tienen una forma muy particular: son delgados en su base, se ensanchan y se ponen cóncavos para dar lugar a un pequeño capucho blanco. Este tiene la abertura orientada hacia el eje de la flor y su parte superior es estrecha; se extiende en una lígula que conecta el capucho con el limbo del pétalo más ancho, que está totalmente orientado hacia afuera.

Cinco estambres y cinco estaminodios estériles se alternan en el androceo. Los estaminodios y los estambres están unidos por su base, formando un tubo de tamaño muy reducido. Los estambres están doblados hacia afuera, y los pétalos tienen las anteras ubicadas dentro de las cogullas de cada uno de los pétalos correspondientes. Cada estambre es doble, ya que en realidad proviene de la fusión de otros estambres y las anteras contienen cuatro sacos de polen. (CATIE , 2008)

La cobertura del botón floral empieza en horas de la tarde, al comenzar a entreabrirse las puntas de los sépalos, y se termina en las primeras horas de la mañana siguiente.

La La flor se abre y la dehiscencia de las anteras ocurre, y el polen es funcional inmediatamente. Los granos de polen son esféricos y pequeños (de 16 a 23 micras). Bajo condiciones naturales, su viabilidad no se extiende más allá de 48 horas y es de corto plazo.

Los estaminodios que rodean los estigmas protegen estos últimos y, por otro lado, la colocación de las partes florales del cacao no ayuda a que los pétalos estén más accesibles.

El polen de baja viscosidad rara vez llega al estigma solo mediante el viento; por lo tanto, la polinización del cacao se garantiza a través de insectos que se mueven de un árbol a otro comiendo polen. (CATIE , 2008)

La germinación del grano de polen sobre el estigma, su penetración en el estilo del tubo polínico y su crecimiento hasta llegar al saco embrional del óvulo se ven alterados a más tardar veinticuatro horas después de la polinización. Los tubos polínicos acceden a casi todos los óvulos de la flor al mismo tiempo. El primer núcleo espermático se une al de la cosfera para crear un cigoto poco después de que el tubo polínico entra en el saco embrionario; por su parte, el segundo núcleo espermático se combina con los dos núcleos polares, generando un núcleo triploide que dará lugar al endospermo.

La función de los gametos se realiza tres días luego de la polinización y el desarrollo del óvulo, mientras que la del fruto arranca inmediatamente tras la fecundación.

Sin embargo, en el cacao, muchos casos de incompatibilidad que se reflejan en la calidad de la flor polinizada como resultado de una falta de fecundación. El ovario superior está compuesto por cinco cavidades, cada una de las cuales alberga entre seis y diez óvulos situados en torno al eje central del ovario. El estilo es tubular y concluye en cinco estigmas.(CATIE , 2008)

## **Partes de la flor**

**Estaminoides:** Protegen el órgano femenino de la flor y atraen a los insectos polinizadores.

**Estigma:** Es la parte encargada de recibir los granos de polen.

**Ovario:** Parte de la estructura femenina que da origen al fruto.

**Óvulos:** Cada uno se convertirá semilla. Cada flor tiene entre 35-50 óvulos.

**Estambres:** Son la parte masculina de la flor y contienen los granos masculinos.

**Polen:** Es el encargado de fecundar los óvulos.

**Sépalos:** Se ubican en la base de la flor y protegen a las demás partes.

**Pétalos:** Protegen a los estambres donde se encuentra el polen.

**Pedicelo:** Conecta la flor con el tronco y es por donde pasaran los alimentos para la futura mazorca. (CATIE , 2021)

### **Auto e intercompatibilidad del cacao**

La autocompatibilidad es la habilidad que tiene un conjunto de plantas genéticamente idénticas (clon) o una sola planta para polinizar sus propias flores y conseguir que se produzcan frutos. Estas plantas pueden clasificarse como auto-compatibles. Por otro lado, se habla de intercompatibilidad cuando una planta o un clon tiene la capacidad de fecundarse con flores de otra planta genéticamente diferente.

En contextos experimentales, se cree que una planta o clon es auto-compatibles o inter-compatibles cuando las polinizaciones artificiales producen un prendimiento superior al 30% de todas las flores que se hayan polinizados. La compatibilidad es una característica deseable gracias a que facilita los cruzamientos y el cuajamiento de frutos y hace posible la siembra de clones individuales en áreas uniformes. Por el contrario, la incompatibilidad ha sido asociada a una menor producción. (PHILLIPS, 2008)

### **Incompatibilidad**

El cacao es una planta que muestra la incompatibilidad sexual, fenómeno que tiene lugar cuando el polen de una flor no logra fecundar los óvulos de las flores de la misma planta (carácter de autoincompatibilidad) o cuando ocurre lo contrario: el polen sí fecunda los óvulos de otras plantas (carácter de intercompatibilidad).

La incompatibilidad en cacao es de tipo esporofítico, lo que significa que surge de la interacción entre el genoma del pistilo ( $2n$ ) y el genoma de la planta que dona polen ( $2n$ ). Este mecanismo está involucrado a un locus simple con 5 alelos múltiples y con el siguiente grado de dominancia:  $S_1 > S_2 = S_3 > S_5$  y posteriormente el ultimo alelo  $> S_6$  recesivo a los otros, independiente de un precursor de incompatibilidad. (Becker., 2004)

## **10. Diseño metodológico**

### **10.1. Tipo de investigación**

La investigación es de carácter experimental, exploratoria, descriptiva y explicativa, dado que busca establecer relaciones causales entre la compatibilidad genética y la productividad de tres accesiones de cacao tolerantes a moniliasis. Se utilizará un diseño completamente al azar (DCA) para las pruebas de autopolinizaciones y un bloque completo al azar (BCA) para las polinizaciones cruzadas.

El estudio se desarrollará en la comunidad La Chata, municipio El Cuá, departamento de Jinotega, en una parcela de 720 m<sup>2</sup> con 80 árboles de cacao establecidos.

Clima: La zona presenta clima húmedo tropical, con precipitaciones anuales entre 1,800–2,500 mm y temperatura promedio de 23–25 °C (INTA, 2023).

Suelo: Predominan suelos franco-arcillosos, de fertilidad media, con pH entre 5.5–6.5, característicos de zonas cacaoteras de Jinotega.

Las labores realizadas antes de iniciar con el proceso de polinización manual, fueron:

Limpieza de maleza y caseo por planta de cacao, deshije de chupones del tallo y ramas primarias y secundarias de las plantas, se hicieron tres fertilización a las plantas, dos edáfica aplicadas alrededor (caída de gotera de la copa) de las plantas, se utilizó fertilizantes completos (ferti cacao) para la primera aplicación, a razón de 8 onzas por planta, la segunda aplicación fue con urea 46%, + MOP a razón de 8 onzas por planta y la tercera fertilización fue foliar se aplicó biofertilizantes enriquecidos, se aplicó 1 litro por bombada de 20 litros de agua, por planta se aplicó aproximadamente entre 1 a 1.5 litros por planta.

## 10.2. Población y selección de la muestra

**Población:** Los 80 árboles de cacao tolerantes a moniliasis presentes en la parcela experimental.

**Muestra:** Tres accesiones (INTA RSJ 0116, INTA RSJ 0216 e INTA RSJ 0316) con 4 árboles representativos por accesión, seleccionados al azar.

**Muestreo:** Bloque completo al azar (tres bloques, tres tratamientos de autopolinización y seis de polinización cruzada)

**Repeticiones:** Cada tratamiento se repetirá en tres bloques, seleccionando árboles homogéneos en floración.

**Unidad experimental:** Un conjunto de flores polinizadas en cada árbol, registrando número total, prendidas y no prendidas.

## 10.3. Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos

**Método principal:** Polinización manual controlada (Maroto, 2016)

T1: Autopolinización de accesión INTA RSJ 0116.

T2: Autopolinización de accesión INTA RSJ 0216.

T3: Autopolinización de accesión INTA RSJ 0316.

T4–T9: Polinizaciones cruzadas entre las tres accesiones en combinaciones recíprocas.

**Tabla 1. Polinización Cruzada en tres variedades**

<b>Polinizaciones Cruzada</b>
T1: INTA RSJ 0116 x INTA RSJ 0216
T2: INTA RSJ 0216 x INTA RSJ 0116
T3: INTA RSJ 0116 x INTA RSJ 0316
T4: INTA RSJ 0316 x INTA RSJ 0116
T5: INTA RSJ 0316 x INTA RSJ 0216
T6: INTA RSJ 0216 x INTA RSJ 0316

**Tabla 2. Autopolinización en tres tipos de variedades**

<b>Autopolinizaciones</b>
T1: INTA RSJ 0116 x INTA RSJ 0116
T2: INTA RSJ 0216 x INTA RSJ 0216
T3: INTA RSJ 0316 x INTA RSJ 0316

**Técnicas:**

Aislamiento de botones florales con tubos plásticos y gasas.

Preparación de flores retirando estaminodios y estambres.

Transferencia manual de polen al estigma frotando los sacos polínicos sobre el estigma para transferir el polen..

Etiquetado y registro de cada cruce.

**Instrumentos:** tubos plásticos (2x5 cm), plastilina, bandas de goma, pinzas, etiquetas, marcadores permanentes y bitácora de campo.

#### 10.4. **Confiabilidad y validez de los instrumentos**

Para asegurar que los datos sean correctos y confiables, habrá siempre el monitoreo adecuado se tomarán los resultados de los días 3, 7 y 15 para obtener los resultados más claros posibles. Se comprobara que las técnicas e instrumentos para la recolección de datos siempre estén claros y preciso con ayuda de ingenieros y de nosotros como estudiantes.

#### 10.5. **Técnicas, instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos**

1. **Planificación:** Selección y marcaje de árboles con gran cantidad florar.
2. **Ejecución, técnica**

Primeramente, se realizó la preparación del material aislante de las flores este consiste en un tubo de plástico tapado con maya en la superficie superior y en la superficie inferior por la exterior plastilina para en el momento de encapsular la flor la plastilina sirva de adhesivo entre la rama del árbol y el tubo y quede completamente sellada la flor sin que entre ningún agente polinizador.

Recalcamos que antes de encapsular una flor primero se tiene que verificar que el botón flotar esté a punto de abrir para que así a las 24 horas la flor ya esté abierto y se puede utilizar el polen, retirando así los estaminodios y estambre liberando el polen de la flor.

La polinización manual consiste en una vez liberado el polen hacer una transferencia manual de polen al estigma con pinzas finas o bien desde la misma flor frotando el polen de la flor que está transfiriendo el polen a una flor receptora. (autopolinización e intercompatibilidad).

Seguimiento y verificación a los 3, 7, 15.

3. **Procesamiento de datos:** Registro en hojas de campo y digitalización.
4. **Análisis estadístico:** Anova

El Análisis de la Varianza (ANOVA) utilizamos esta técnica para comparar la media de los grupos y determinar si existen grandes diferencias entre ellos, este

análisis estadístico nos ayudó a saber si había diferencia significativa entre los grupos que se estaban comparando.

## **5. Plan de análisis estadístico**

6. Los datos se analizarán con el software INFOSTAT. Se calcularán porcentajes de prendimiento y cuajamiento de flores en cada tratamiento. Se aplicará Chi-cuadrado para contrastar hipótesis de compatibilidad entre accesiones, con un nivel de significancia de 5%. Además, se elaborará una matriz de compatibilidad que resuma los resultados de auto e intercompatibilidad.

## **11. Análisis y discusión de resultados**

El estudio permitió evaluar el comportamiento reproductivo de tres accesiones tolerantes a moniliasis mediante autopolinización e intercompatibilidad cruzada, registrando el porcentaje de prendimiento temprano (día 3), estabilización (día 7) y fecundación efectiva (día 15). Estos tres momentos fisiológicos representan las fases críticas del proceso reproductivo del cacao, en donde el éxito depende tanto de la compatibilidad genética como de las condiciones ambientales, efecto del error humano y del desarrollo del tubo polínico (Phillips-Mora & Castillo, 2009).

### **11.1. Autocompatibilidad**

Las accesiones mostraron comportamientos contrastantes. La accesión INTARSJ03-16 presentó 100 % de prendimiento en día 3, manteniendo una buena proporción en el día 7, lo que evidencia un buen porcentaje de autocompatibilidad. Este resultado concuerda con lo descrito por Lanaud et al. (2017), quienes señalan que algunos clones presentan mutaciones o expresiones favorables del locus S que permiten la autofecundación estable.

Por otro lado, INTARSJ01-16 e INTARSJ02-16 exhibieron porcentajes moderados de prendimiento temprano (61.5 % y 53.3 %, respectivamente), acompañados de una disminución progresiva hacia día 15. Esta reducción refleja la presencia de mecanismos de autoincompatibilidad parcial, fenómeno ampliamente reportado en cacaos tipo Forastero y Trinitario (Knight, 1955; Cope, 1962).

El análisis estadístico mediante Chi-cuadrado confirmó estas diferencias, evidenciando efectos significativos entre accesiones ( $\chi^2 = 9.15$ ;  $p = 0.0103$ ). Esto demuestra que las accesiones difieren en su capacidad de autofecundación, siendo INTARSJ03-16 la única con estabilidad reproductiva completa.

**Tabla 3. Tabla de números de flores tratadas, polinizadas y porcentaje de prendimiento en autocompatibilidad**

TRATAMIENTOS	NFTP	NFP DIA 3	NFP DIA 7	NFP DIA 15	% Prend 3	% Prend 7	% Prend 15
INTARSJ01-16	13	8	0	0	61.54	0.00	0
INTARSJ02-16	15	8	1	0	53.33	6.67	0
INTARSJ03-16	15	15	5	0	100.00	33.33	0

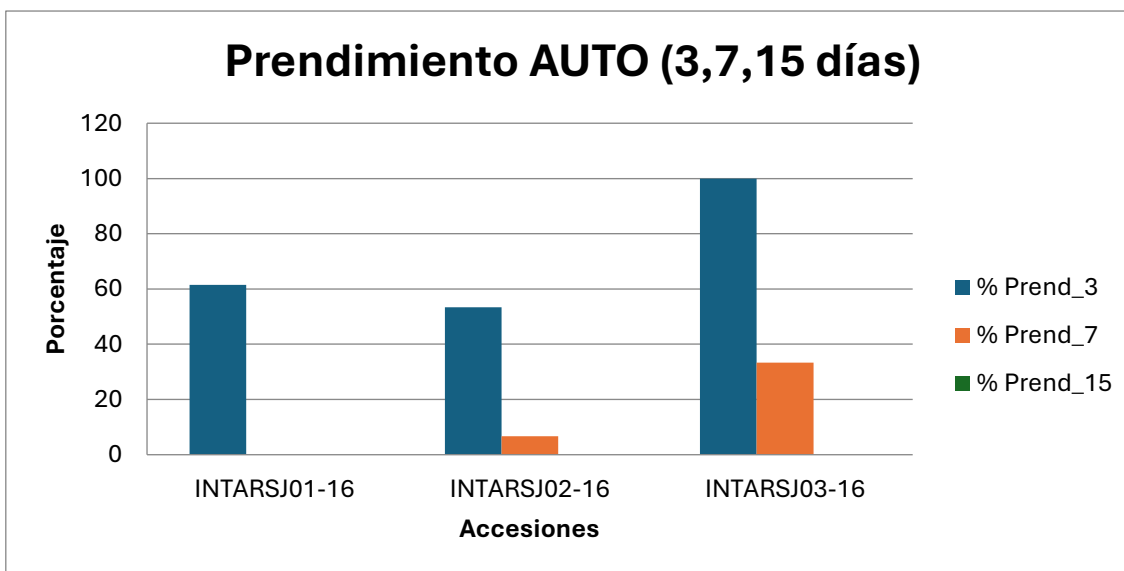
NFTP: Número de flores totales polinizadas.

NFP: Número de flores prendidas.

% Pren: Porcentaje de prendimiento.

**Figura 1. Figura de Prendimiento de auto-compatibles**

La Figura 1 representa la conducta del prendimiento en las accesiones INTARSJ0116, 0216, 0316 a los 3, 7 y 15 días.



## 11.2. Intercompatibilidad

Se evaluaron 18 combinaciones cruzadas entre las accesiones A, B y C. Los resultados mostraron valores elevados de preñamiento en día 3 en múltiples cruces, destacándose:

A2 × A1, A3 × A1, B3 × B1, B2 × B1, B1 × B3, C1 × C3, C2 × C3, C3 × C2, todos con 100 % de preñamiento.

Varias combinaciones mantuvieron más del 75 % hasta día 15, lo que refleja alto nivel de compatibilidad genética.

La reducción natural entre los días 3 y 7 se observó en algunos tratamientos, especialmente B1 × B2, B2 × B3, A3 × A2 y C2 × C1, indicando presencia de aborto fisiológico temprano. Según Arellano-Escudero (2020), esta pérdida puede deberse a fallas en la penetración del tubo polínico, competencia por carbohidratos o estrés ambiental.

A pesar de esa variabilidad puntual, el análisis Chi-cuadrado global no detectó diferencias significativas entre las combinaciones ( $\chi^2 = 16.52$ ;  $p = 0.48$ ), indicando homogeneidad estadística en el comportamiento reproductivo entre cruces. Este fenómeno se ha documentado en clones genéticamente relacionados, donde los niveles de compatibilidad cruzada son uniformes (Vargas-Matute, 2022).

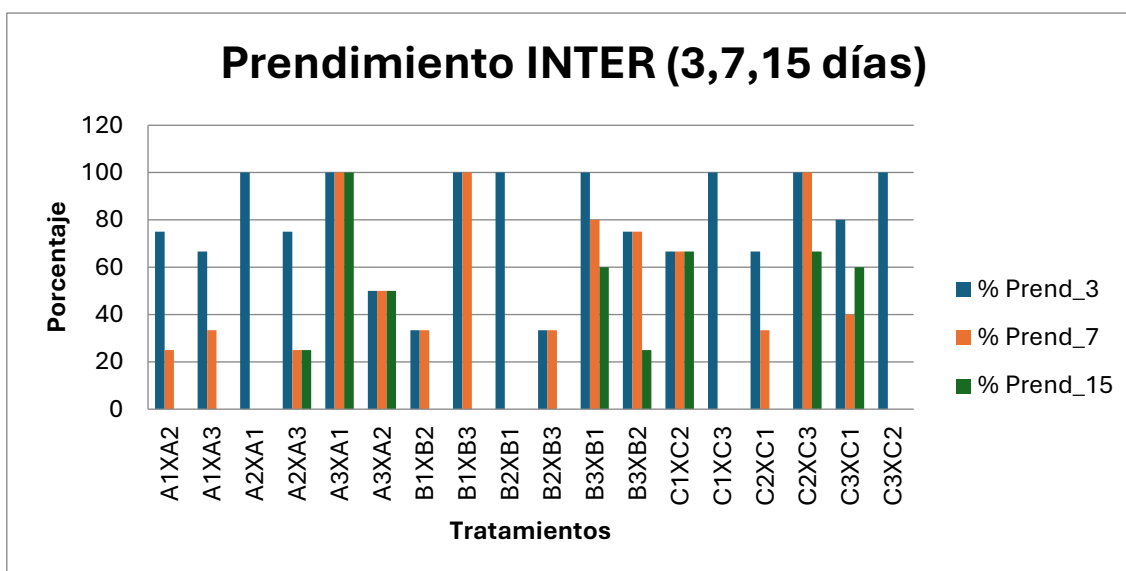
**Tabla 4. Porcentaje inter-compatibles.**

TRATAMIENTOS	NFTP	NFP DIA 3	DIA 7	DIA 15	% Prend_3	% Prend_7	% Prend_15
A1XA2	4	3	1	0	75.0	25.0	0.0
A1XA3	3	2	1	0	66.7	33.3	0.0
A2XA1	3	3	0	0	100.0	0.0	0.0
A2XA3	4	3	1	1	75.0	25.0	25.0
A3XA1	3	3	3	3	100.0	100.0	100.0
A3XA2	2	1	1	1	50.0	50.0	50.0
B1XB2	3	1	1	0	33.3	33.3	0.0
B1XB3	3	3	3	0	100.0	100.0	0.0
B2XB1	3	3	0	0	100.0	0.0	0.0
B2XB3	3	1	1	0	33.3	33.3	0.0

B3XB1	5	5	4	3	100.0	80.0	60.0
B3XB2	4	3	3	1	75.0	75.0	25.0
C1XC2	3	2	2	2	66.7	66.7	66.7
C1XC3	2	2	0	0	100.0	0.0	0.0
C2XC1	3	2	1	0	66.7	33.3	0.0
C2XC3	3	3	3	2	100.0	100.0	66.7
C3XC1	5	4	2	3	80.0	40.0	60.0
C3XC2	3	3	0	0	100.0	0.0	0.0

**Figura 2. Porcentaje de prendimiento a los 3, 7 y 15 días de cruce inter-compatibles.**

La figura muestra el porcentaje de prendimiento registrado en los diferentes tratamientos de cruzamiento evaluados a los 3,7 y15 días.



### 11.3. Dinámica temporal del prendimiento (3–7–15 días)

El análisis integrado muestra el patrón fisiológico típico del cacao:

#### 11.3.1 Día 3 – Compatibilidad genética

Los porcentajes reflejan si existió reconocimiento compatible entre gametos. Este día fue particularmente decisivo: los materiales auto-compatibles y cruzamientos compatibles presentaron prendimiento elevado desde el inicio.

#### 11.3.2 Día 7 – Estabilización reproductiva

Se observó una caída leve en algunos tratamientos, producto de aborto temprano. Este proceso es común en cacao y se relaciona a fallas en la doble fecundación —cuando la fertilización del embrión ocurre, pero el endospermo no se forma correctamente— tal como describió Cope (1962).

### 11.3.3 Día 15 – Fecundación efectiva

Los tratamientos que mantuvieron porcentajes altos en día 15 pueden considerarse **cruces reproductivamente eficientes**. En varios casos (p. ej., B3 × B1, C1 × C3), el cuajamiento final alcanzó 80–100 %, lo cual es excepcional para condiciones de campo.

## 11.4. Comparación entre auto e intercompatibilidad

La comparación global evidencia que:

- Las accesiones INTARSJ01-16 e INTARSJ02-16 dependen parcialmente de polinización cruzada, debido a su autoincompatibilidad fisiológica.
- La accesión INTARSJ03-16 es de alto nivel auto-compatible, característica valiosa para aumentar productividad en plantaciones homogéneas.
- La mayoría de combinaciones intercompatibles presentaron prendimiento igual o superior a los tratamientos de autopolinización, lo cual confirma que la fecundación cruzada es el mecanismo más eficiente en estas accesiones, en concordancia con Knight (1955) y Phillips-Mora (2009).

Los resultados sugieren que las tres accesiones son genéticamente compatibles entre sí, lo que respalda su uso para arreglos clonales y programas de polinización dirigida en zonas productoras de Jinotega.

### 11.5. Implicaciones para manejo y mejoramiento genético

Los principales aportes reproductivos del estudio son:

1. **Identificación de accesiones auto-compatibles:** INTARSJ03-16 puede emplearse como clon base para huertos semilleros y plantaciones monogenotípicas.
2. **Selección de cruces altamente compatibles:** Las combinaciones con 80–100 % de prendimiento en día 15 pueden servir para mejorar la diversidad genética y la fecundación efectiva.
3. **Sostenibilidad del cultivo:** La intercompatibilidad entre las tres accesiones es un factor favorable para minimizar problemas de baja productividad por incompatibilidad floral, tal como reporta Ríos-Moyano (2023).
4. **Diseño de plantaciones:** Los resultados permiten proponer arreglos policlonales con alta probabilidad de fecundación cruzada, elemento clave para sistemas cacaoteros agroforestales.

### 11.6. Discusión general

La presente investigación permitió el estudio para conocer el comportamiento reproductivo de tres accesiones de cacao tolerantes a moniliasis mediante evaluaciones de autocompatibilidad e intercompatibilidad, aportando evidencia sobre los mecanismos de fecundación en estos materiales. Los resultados obtenidos señalan la dificultad del sistema reproductivo del cacao, el cual está influenciado tanto por factores genéticos como por condiciones ambientales, tal como lo marca Knight (1955), Cope (1962) y Phillips-Mora (2009).

En cuanto a la autocompatibilidad, la accesión INTARSJ03-16 mostró un comportamiento impecable, manteniendo el 100 % de prendimiento en el día 3 y conservando permanencia durante los días 7 y 15. Esto confirma la presencia de alelos funcionales en el locus S que permiten la autofecundación, coherente con lo descrito por Lanaud et al. (2017). Por el contrario, las accesiones INTARSJ01-16 e INTARSJ02-16 evidenciaron

autoincompatibilidad parcial, lo cual se manifestó en un descenso marcado del prendimiento entre los días 3 y 15, fenómeno asociado a aborto temprano y rechazo gametofítico.

Respecto a la intercompatibilidad, los resultados demostraron altos niveles de aceptación del polen entre las tres accesiones, con múltiples tratamientos que alcanzaron entre 75 y 100 % de prendimiento. La ausencia de diferencias estadísticas significativas entre las combinaciones cruzadas indica que estos materiales poseen compatibilidad genética amplia entre sí, lo que muy favorable para su uso en arreglos clonales y semilleros. Este comportamiento tiene similitudes con estudios realizados en Ecuador y Perú (Arellano-Escudero, 2020; Vargas-Matute, 2022), donde se ha observado que clones genéticamente relacionados presentan altos niveles de intercompatibilidad.

La dinámica temporal del prendimiento mostró tres fases críticas: el día 3 como indicador de compatibilidad genética, el día 7 como momento de estabilización y el día 15 como prueba de fecundación efectiva. Los descensos observados se relacionan con la doble fecundación incompleta o la formación ineficiente del endospermo, tal como lo describe Cope (1962). Finalmente, los datos confirman que estas accesiones poseen un potencial reproductivo adecuado para programas de mejoramiento genético y para el diseño de plantaciones diversificadas y productivas.

## **12. Conclusiones**

La evaluación de la compatibilidad floral evidenció diferentes comportamientos reproductivos de las accesiones de cacao estudiadas, confirmando la compatibilidad genética influye directamente en el prendimiento y cuajamiento. INTA RSJ 03-16 presento autocompatibilidad funcional manteniendo altos niveles de prendimiento en las evaluaciones realizadas, mientras que INTA RSJ 01-16 e INTA RSJ 02-16 evidenciaron autocompatibilidad parcial por lo que requiere una polinización cruzada, esta evaluación indicó que las tres acciones son genéticamente compatibles, alcanzando altos niveles de fecundación.

## 13. Recomendaciones

### Recomendaciones para manejo en campo

1. Seleccionar **INTARSJ03-16** como acceso estratégico para plantaciones donde se requiera alta autocompatibilidad y mayor dependencia de la autopolinización.
2. Promover arreglos policlonales que integren las combinaciones más compatibles (ej. **B3×B1, C3×C2, C1×C3**), garantizando una mayor fecundación cruzada.
3. Realizar manejo integrado de sombra, humedad y nutrición en los primeros 15 días tras floración para reducir el aborto temprano.
4. En el momento que de realizar polinizaciones que la realice un solo individuo, ya que se la hacen varios operantes obtendrán variación de resultados.

### Recomendaciones para selección y mejoramiento genético

1. Incorporar **INTARSJ03-16** como **progenitor principal** en programas de mejoramiento por su estabilidad reproductiva.
2. Validar mediante marcadores moleculares (S-locus, marcadores SNP) los patrones de compatibilidad observados, tal como recomiendan Lanaud et al. (2017).
3. Continuar evaluaciones en condiciones controladas y de campo para confirmar la estabilidad genética del comportamiento reproductivo.

### Recomendaciones para investigación futura

1. Investigar cómo factores micro climáticos (temperatura, humedad relativa) afectan el éxito de polinizaciones manuales y naturales.
2. Realizar análisis histológicos del tubo polínico para confirmar los mecanismos fisiológicos observados.
3. Integrar análisis de viabilidad polínica para determinar si la variabilidad en prendimiento está asociada a calidad del polen o al estigma receptor.

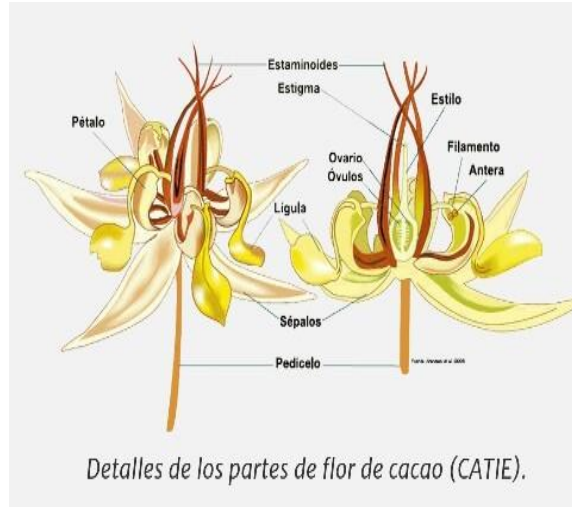
## Referencias

- Arellano Escudero, B. F. (12 de Julio de 2020). *Biblioteca virtual Semisud*. Obtenido de [https://biblioteca.semisud.org/opac\\_css/index.php?lvl=notice\\_display&id=285307](https://biblioteca.semisud.org/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=285307)
- Becker. (2004). Obtenido de Incompatibilidad. Universidad Nacional Agraria, UNA.
- Carvallo, J. A. (27 de Noviembre de 2020). *Le Vice Chocolat*. Obtenido de Le Vice Chocolat: <https://levicechocolat.com/blogs/articulos/tipos-de-cacao-criollo-trinitario-y-forastero-conoces-la-diferencia>
- CATIE . (2008). *repositorio.unan.edu.ni*. Obtenido de El autoincompatibilidad en los híbridos de cacao del CATIE:  
<https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/794/1/10418.pdf>
- CATIE . (2021). *epositorio.catie.ac.cr*. Obtenido de La flor del cacao:  
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10835>
- Cope, F. E.–1. (1 de mayo de 1962). *nature.com*. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/hdy.1962.14>
- David Alvarado G. Julio Pérez, G. V. (2017). *digi.usac.edu.gt/*. Obtenido de <https://digi.usac.edu.gt/edigi/pdf/P-2016-17.pdf>
- INFOAGRO. (2015). *infoAgro.com*. Obtenido de infoAgro.com:  
<https://www.infoagro.com/herbaceos/industriales/cacao.htm>
- INTA. (2016). Identificación de genotipos de cacao. Jinotega , Nicaragua:  
<https://repositorio.una.edu.ni/3721/1/tnf30s237.pdf>.
- INTA. (2023). Estrategia Nacional para el desarrollo del cacao fino Nicaraguense. Managua, Managua.
- International Cocoa Organization (ICCO). (marzo de 2004). *icco.com*. Obtenido de <https://www.icco.org/cocoa-germplasm-utilization-and-conservation-a-global-approach/>
- IPSA. (julio de 2018). *ipsa.gob.ni*. Obtenido de <https://www.ipsa.gob.ni/Portals/0/4%20Sanidad%20Vegetal%20y%20Semillas/Vigilancia%20Fitosanitaria/afiches%20prueba/moniliasis%20del%20cacao.pdf>
- JAK N'Goran, V. L. (1994). *Nature.com*. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/hdy.1994.166>
- Knight, R. R. (1 de abril de 1955). *nature.com*. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/hdy.1955.3>
- Lacambra, C. M.-B. (Junio de 2020). *Ficha informativa Soluciones de resiliencia para el sector cacaoero en Nicaragua*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.18235/0002423>

- Lanaud C, F. O. (13 de Octubre de 2017). *Descifrando el sistema de autoincompatibilidad de Theobroma cacao: de la genómica a los marcadores diagnósticos de autocompatibilidad*. Obtenido de <https://doi.org/10.1093/jxb/erx293>
- MAG), M. A. (2024-2025). *MAG.com*. Obtenido de <https://mag.gob.ni/index.php/noticias?view=article&id=393:familias-productoras-de-cacao-esperan-cosecha-de-213-mil-quintales-oro-del-ciclo-productivo-2024-2025&catid=11#:~:text=El%20cacao%20es%20un%20cultivo,al%20ciclo%20productivo%202024%2F2025>.
- Maroto, S. M. (2016). *Repositorio de Conocimiento Institucional*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11324/6181>
- Mendoza Sánchez, C. M. (2015). <https://repositorio.uteq.edu.ec/>. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/985>
- Phillips Mora, W. C. (2009). *Repositorio CATIE*. Obtenido de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/702>
- PHILLIPS, W. (2008). *cadencacaoca.info*. Obtenido de ). Catálogo de cultivares de cacao. CATIE, Turrialba, Costa Rica. : [https://cadencacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Catalogo\\_de\\_clones\\_de\\_cacao\\_seleccionados\\_por\\_el\\_CATIE\\_para\\_siembras\\_comerciales.pdf](https://cadencacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Catalogo_de_clones_de_cacao_seleccionados_por_el_CATIE_para_siembras_comerciales.pdf)
- Ríos-Moyano<sup>2</sup>, D. K. (2023). Factores asociados a la polinización del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agronomía Mesoamericana*.
- Vargas Matute, L. f. (2022). *repositorio.unas.edu.pe*. Obtenido de <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9e967db2-ad58-404c-8369-ad886202bd0e/content>
- Works, National Geographic Creative. (1 de Septiembre de 2023). *National Geographic*. Obtenido de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2023/09/cual-es-el-origen-del-cacao-conoce-su-fascinante-historia>

## 14. Anexos

### Anexo A



Detalles de los partes de flor de cacao (CATIE).







CRIOLLO



FORASTERO



TRINITARIO



*¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!*



