

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Agronomía - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



Informe Final Tesis de Posgrado para Acceder al Título de
MAGÍSTER DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES EN
METEOROLOGÍA AGRÍCOLA

Modelado agroclimático para la predicción de Monilia (*Moniliophthora roreri*) en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la República de Colombia.

Alumno: **Ing. Agr. Eduar Enrique Pinzón Correa**

Director: **Ing. Agr. M.Sc. Dr. Ricardo C. Moschini**

Co-Director: **Ing. Agr. Dr. Eduardo R. Wright**

Buenos Aires, 15 de diciembre 2021

1. CONTENIDO

1.	CONTENIDO.....	1
2.	RESUMEN.....	3
3.	SUMMARY	4
4.	INTRODUCCIÓN	7
5.	JUSTIFICACIÓN.....	9
6.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
6.2	OBJETIVO GENERAL.....	10
6.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
7.	MARCO CONCEPTUAL.....	11
7.1	EL CULTIVO DEL CACAO (<i>Theobroma cacao</i>).....	11
7.1.1	Historia del cultivo	11
7.1.2	Clasificación taxonómica del cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.)... ;Error! Marcador no definido.	
7.1.3	La planta de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.)..... ;Error! Marcador no definido.	
7.1.4	Variedades de cacao	12
7.1.5	Descripción botánica de la planta de cacao..... ;Error! Marcador no definido.	
7.2	IMPORTANCIA Y LIMITANTES DEL CULTIVO DE CACAO	14
7.2.1	Importancia social	14
7.2.2	Importancia económica.....	15
7.2.3	Importancia ambiental.....	15
7.2.4	Limitantes fitosanitarias del cultivo.....	16
7.3	LA MONILIA <i>Moniliophthora roreri</i> H.C. Evans <i>et al.</i> (1978).....	16

7.3.1	Origen y distribución de la monilia.	17
7.3.2	Taxonomía de <i>M. roreri</i>	19
7.3.1	Características del hongo.....	20
7.3.2	Ciclo de vida de <i>M. roreri</i> y su dispersión	20
7.3.3	Síntomas de la enfermedad.....	22
7.3.4	Desarrollo de la enfermedad.....	24
7.3.5	Epidemiología de la monilia ¡Error! Marcador no definido.	
8.	Sistemas De Pronóstico De Enfermedades Basados En El Ambiente	27
9.	MATERIALES Y MÉTODOS	29
9.1	Área De Estudio	29
9.2	Análisis de la Incidencia de monilia observada.....	30
9.3	Desarrollo de modelos de regresión logística de respuesta binaria y ordinal	31
10.	DISCUSION.....	40
11.	CONCLUSIONES.....	43
12.	BIBLIOGRAFÍA	45

2. RESUMEN

El cacao es un cultivo de gran relevancia económica, social y ambiental para Colombia, constituyéndose en una especie primordial del sistema agroforestal campesino de muchas regiones. Sin embargo, existen varios factores que afectan la calidad y producción de los granos de cacao, siendo las enfermedades la principal limitante. La monilia, causada por el hongo *Moniliophthora roreri*, se destaca como el problema fitosanitario que afecta al cacao en Latinoamérica con mayor severidad. En Colombia, esta enfermedad puede causar pérdidas que oscilan entre el 40% y 100% de la producción, lo cual está relacionado con la severidad del ataque del patógeno, las condiciones ambientales y el manejo del cultivo. En este trabajo se elaboraron modelos matemáticos que permiten identificar y cuantificar el efecto ambiental-genético sobre los niveles de enfermedad, siendo una herramienta de apoyo en el manejo integrado del cultivo. Para satisfacer este objetivo, se utilizaron datos mensuales de incidencia (Inc%) de monilia, durante el periodo 2005 – 2011, registrados por Fedecacao en dos sitios: La Cabaña y Chimita, pertenecientes al Departamento Santander, Colombia. En primer lugar, se analizaron los efectos año y mes sobre la incidencia de *M. roreri*, resultando significativos al 1% en ambos sitios. Por el test de Duncan, el clon FLE-2 (>Incidencia de monilia, más susceptible) difirió significativamente del clon CCN-51 (<Incidencia, más resistente) en La Cabaña y Chimita. Esa diferencia estadística en la respuesta genética de ambos clones respecto a la incidencia de monilia, avaló su inclusión como variable discreta regresora (Susc=0, resistente; Susc=1, susceptible) en modelos de regresión logística de respuesta binaria y ordinal. Las variables meteorológicas regresoras se calcularon a partir de registros diarios de precipitación del periodo 2005 – 2011 provenientes de la estación meteorológica automática San Vicente de Chucurí (Departamento Santander). Las correlaciones de Kendall (r_k) entre las variables meteorológicas analizadas (asociadas a la ocurrencia de precipitación) y los niveles de enfermedad (binarios y ordinales) fueron bajas. En La Cabaña se destacó la correlación positiva presentada por la variable PPrec1 ($r_k = 0,14$ y $0,19$, para respuesta ordinal y binaria). Valores más altos de PPrec1 (número de períodos de dos días consecutivos con precipitaciones $>1\text{mm}$ en ambos días) se asociarían a la satisfacción del requerimiento de mojado del fruto, necesario para el proceso de infección fúngica. En Chimita, los más altos coeficientes de correlación ($r_k = 0,34$ y $0,29$, para respuesta ordinal y binaria) se observaron para la variable PPrec8 (períodos de dos días con precipitación $>8\text{mm}$ en ambos días) En

ambos sitios, la variable discreta Susc presentó coeficientes de correlación moderados y positivos (r_k de 0,31 a 0,23). Utilizando la técnica de regresión logística se pudieron desarrollar modelos preliminares para predecir las probabilidades de ocurrencia de niveles (binarios y ordinales) de incidencia de monilia, en base a variables genético-ambientales en ambos sitios. Los mayores índices de habilidad predictiva fueron alcanzados por los modelos de regresión logística de respuesta binaria en ambos sitios. En La Cabaña, el modelo de regresión binario más preciso (precisión de predicción: 84,5%) incluyó a las variables PPrec1, PrecAc (precipitación acumulada, pendiente negativa) y Susc (0 o 1: comportamiento de los clones). En Chimita, el más preciso modelo binario (precisión de predicción: 77,3%) incluyó una variable simple (PPrec8) y la interacción de la variable discreta (Susc) con DPrec8 (días con precipitación >8mm). PPrec8 y DPrec8 podrían asociarse a la ocurrencia de lluvias con energía suficiente (se descartan los días con lloviznas) necesaria para la dispersión de conidios del patógeno y a la película de agua necesaria para la infección fúngica. Para este estudio, se observó que el período crítico susceptible en el cual se calculan las variables meteorológicas tuvo una extensión de 40 días (inicio y fin: 80 y 40 días previos al fin de cada mes), coincidente con la aparición de síntomas externos después de 40 a 80 días del evento de infección.

Palabras clave: *cacao, monilia, incidencia, modelo, coeficientes de correlación, variables regresoras, periodo crítico, infección, habilidad predictiva.*

3. SUMMARY

Cocoa is a crop of economic, social and environmental relevance for Colombia, becoming a primary species in the peasant agroforestry system in many regions. However, there are several factors that affect the quality and production of cocoa beans, with diseases being the main limitation. Monilia, caused by the fungus *Moniliophthora roreri*, stands out as the phytosanitary problem that affects cocoa in Latin America with the greatest severity. In Colombia, this disease can cause losses that range between 40% and 100% of production, which is related to the severity of the pathogen attack, environmental conditions and crop management. In this work, mathematical models were elaborated that allow to identify and quantify the environmental-genetic effect on the disease levels, being a support tool in the integrated management of the crop. To meet this objective, monthly incidence data (Inc%) of

monilia were used, during the period 2005 - 2011, registered in Fedecacao in two locations: La Cabaña and Chimita in San Vicente de Chucuri Santander, Colombia. Data from the daily rainfall of the period 2005 - 2011, registered by the automatic meteorological station San Vicente de Chucurí, to calculate the meteorological variables. In the first place, the year and month effects on the incidence of *M. royeri* were reported, being significant at 1% in both sites. By the Duncan test, the clone FLE-2 (> monilia Incidence, more susceptible) differed significantly from clone CCN-51 (<Incidence, more resistant) in La Cabaña and Chimita. This statistical difference in the genetic response of both clones regarding the incidence of monilia, endorsed its inclusion as a discrete variable regressor in logistic models (Susc = 0, resistant, Susc = 1, susceptible). The Kendall correlations (r_k) between the meteorological variables analyzed (associated with the occurrence of precipitation) and the disease levels (binary and ordinal) were low. In La Cabaña the positive correlation presented by the variable PPrec1 (r_k = 0.14 and 0.19, for ordinal and binary response) was highlighted. Higher values of PPrec1 (number of periods of two consecutive days with rainfall > 1mm on both days) would be associated with the satisfaction of the requirement of wetting of the fruit, necessary for the process of fungal infection. In Chimita, the highest correlation coefficients (r_k = 0.34 and 0.29, for ordinal and binary response) were observed for the variable PPrec8 (two-day periods with precipitation > 8mm on both days) In both sites, the discrete variable Susc presented moderate and positive correlation coefficients (r_k from 0.31 to 0.23). Using the logistic regression technique, preliminary models could be developed to predict the probabilities of occurrence of levels (binary and ordinal) of monilia incidence, based on genetic-environmental variables in both sites. The highest predictive ability indexes were reached by the binary response logistic regression models at both sites. In La Cabaña, the most accurate binary regression model (prediction accuracy: 84.5%) included the variables PPrec1, PrecAc (accumulated precipitation, negative slope) and Susc (0 or 1: behavior of the clones). In Chimita, the most accurate binary model (prediction accuracy: 77.3%) included a simple variable (PPrec8) and an interactive one that arises from the product of the discrete variable (Susc) with DPrec8 (days with precipitation > 8mm). PPrec8 and DPrec8 could be associated to the need of the fungus of the occurrence of rains with sufficient energy (the days with drizzles are discarded) for the dispersion of conidia of the pathogen and at the same time serve as a source of wet of the ears, necessary for the fungal infection. For this study, it was observed that the critical susceptible period in which the meteorological variables are

calculated had an extension of 40 days (beginning and end: 80 and 40 days prior to the end of each month), coinciding with the appearance of external symptoms after 40 to 80 days after the infection event.

Key words: *cocoa, monilia, incidence, model, correlation coefficients, returnable variables, critical period, infection, predictive ability.*

4. INTRODUCCIÓN

El cacao es un árbol nativo de la selva tropical húmeda de América, particularmente, de la cuenca amazónica, región considerada su centro de origen (Cuatrecasas, 1964; Bartley, 2005). Su cultivo ha sido importante en la cultura y comercio en Mesoamérica desde tiempos precolombinos (Phillips-Mora *et al.*, 2007). Para el año 2013 se reportó un área total sembrada de 7.998.149 ha en las tierras tropicales en el mundo (FAO, 2015). Su cultivo se realiza principalmente como componente de agroecosistemas complejos, ofreciendo beneficios económicos y ecológicos tanto a los agricultores (en su mayoría son campesinos) como a los países donde se produce (Wood y Lass, 1985).

La producción mundial de cacao se ve impactada negativamente por la incidencia de enfermedades, las cuales causan pérdidas que pueden llegar a disminuir el 30% o más del potencial productivo de las plantas. En la actualidad, las enfermedades del cacao con mayor potencial de daño son las causadas por hongos basidiomicetes del género *Moniliophthora*. Estas son “monilia”, causada por el hongo *Moniliophthora roreri* y “escoba de bruja” causada por el hongo *Moniliophthora perniciosa* (Bartley, 2005).

M. perniciosa, ocasionó en un periodo de 10 años la reducción de 70% de la producción de cacao en Brasil mientras que *M. roreri* afecta las plantaciones del centro y sur de América (Jaimes y Aránzazu, 2010), convirtiéndose en la mayor amenaza para la producción mundial de cacao. Aún no se ha presentado en África del este, por lo que es considerada una seria amenaza que podría desequilibrar la economía del cultivo (Hebbar, 2007),

En Colombia alrededor de 40% de la producción se ve afectada por monilia. Algunas condiciones que se relacionan con la zona agroecológica, la cantidad de inóculo y el inadecuado manejo hacen que las pérdidas lleguen hasta 100%, cuando no se implementan estrategias eficientes de manejo. Por tanto, la enfermedad de la monilia es considerada como la más prevalente y severa en el cacao cultura colombiana (Jaimes y Aránzazu, 2010).

En Colombia intervienen de forma directa en su explotación más de 25 mil familias, de las cuales, el 90% desarrolla su proceso productivo en condiciones de economía campesina. El Censo Nacional Agropecuario, realizado en el 2013, señala que el área sembrada con cultivos de cacao fue de 199.549 ha, de las cuales en el Departamento de Santander se ubicaban

46.767 ha, es decir, el 23,4% del área a nivel nacional. En cuanto a producción, para el mismo año, Santander aportó el 29,5% de las toneladas producidas, siendo el departamento con mayor participación a nivel nacional (DANE, 2016). La mayor parte de la producción actual de Colombia es demandada como materia prima por la industria de chocolate, la cual genera gran cantidad de empleos para la fabricación y comercialización de los productos elaborados (Jaimes y Aránzazu, 2010).

Las condiciones climáticas y la cantidad de conidios libres son factores determinantes en el ciclo de vida de *M. roreri*. En las regiones productoras de Colombia el ciclo comienza con la estación seca en la que se encuentran la mayor cantidad de conidios en el ambiente y, la época de lluvias que brinda condiciones de alta humedad en el aire para que se inicie la infección (Evans, 1981; Jaimes y Aránzazu, 2010).

5. JUSTIFICACIÓN

En los países menos desarrollados, el manejo fitosanitario en la mayoría de cultivos se basa en la implementación de labores culturales aplicadas en forma empírica, por tanto, no se realizan en los momentos y con las frecuencias correctas, por ejemplo, la mayoría de los productores no realizan prácticas de poda, o las realizan en momentos y de forma inadecuadas, en consecuencia, se encuentran árboles muy densos y con alturas superiores a los cinco metros. Los fungicidas de síntesis química se emplean inapropiadamente en etapas tardías o con métodos, frecuencia y equipos inadecuados (Hebbar, 2007).

En Colombia se presentan condiciones favorables para la infección y desarrollo de monilia durante todo el año. El hongo con los frutos infectados esporula en ventanas temporales que coinciden con los períodos de cosecha. Existe una estrecha correlación entre la cantidad de lluvia en los períodos de floración-formación de frutos y los niveles que alcanza la enfermedad. Por tal motivo, es estratégico considerar el periodo entre la cosecha y la próxima floración en el monitoreo de la enfermedad (Oliveira y Luz, 2005).

Como soporte al manejo estratégico y táctico de las enfermedades se desarrollan sistemas de pronóstico o modelos predictivos de las mismas, fundamentados en factores ligados al hospedante, al patógeno y al ambiente (Moschini *et al.*, 2006).

El presente estudio relaciona la variación de la precipitación con la incidencia de monilia en el cultivo de cacao, ajustando modelos empíricos de regresión logística. Estos modelos preliminares validados pueden constituir una herramienta útil para el planteo de estrategias de adaptación ante la variabilidad climática. En el marco del manejo integrado de la enfermedad, estos modelos pueden predecir las probabilidades de ocurrencia de niveles epidémicos, constituyéndose en una herramienta complementaria a otras acciones como el monitoreo en campo y el uso de umbrales de daño económico.

6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

6.2 OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto de las condiciones meteorológicas y de la susceptibilidad de los clones sobre los niveles de incidencia de monilia en el cultivo de cacao.

6.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diferenciar la susceptibilidad de clones de cacao a la monilia, analizando registros mensuales de incidencia de la enfermedad en dos sitios (La Cabaña y Chimita) del Departamento Santander, Colombia.
- Identificar las variables meteorológicas (sólo las ligadas a la precipitación) y el período crítico susceptible en el cual se calculan, que maximizan la correlación con los niveles de incidencia de monilia en el cultivo de cacao (ambos sitios).
- Desarrollar modelos de regresión logística basados en variables meteorológicas y en la susceptibilidad de los clones de cacao para predecir la probabilidad de ocurrencia de niveles binarios u ordinales de incidencia mensual de monilia (ambos sitios).

7. MARCO CONCEPTUAL

7.1 EL CULTIVO DEL CACAO (*Theobroma cacao*)

7.1.1 Historia del cultivo

El género *Theobroma*, se originó hace millones de años en América del Sur, al este de la cordillera de los Andes. Sin embargo, el lugar de origen de *T. cacao* es incierto (Young, 1994). Tradicionalmente se consideraba que el punto de origen se encuentra en Mesoamérica entre México, Guatemala y Honduras, dónde ya era cultivado por los mayas hace más de 2.500 años. Los estudios recientes demuestran que por lo menos una variedad de cacao (*T. cacao*) tiene su punto de origen en la Alta Amazonía y que ha sido utilizada en la región por más de 5.000 años (Asociación Nacional de Exportadores de Cacao - Ecuador, 2015). El cacao criollo (*T. cacao* ssp. *Cacao*) representativo de Centroamérica fue cultivado por los Mayas desde hace más de 1.500 años. Los individuos de la cuenca amazónica, se incluyen en el segundo grupo morfogeográfico *forastero* denominado *T. cacao* ssp. *Sphaerocarpum* (Toxopeus, 2001). Motamayor *et al.* (2002) realizaron análisis de RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphisms) y microsatélites, encontrando que el cacao criollo tiene una diversidad genética significativamente baja que probablemente se originó de unos pocos individuos en América del Sur, pudiendo haber sido propagados por el hombre dentro de Centroamérica.

Las culturas mesoamericanas como los toltecas, mayas y aztecas lo cultivaban hace un milenio antes del descubrimiento de América. El cacao era empleado como una especie de moneda y para preparar una bebida aromática que se obtenía de sus frutos, denominada “*xocolatl*” (Tovar, 2000; Ploetz, 2007; De Almeida y Valle, 2008; Girón *et al.*, 2012; Asociación Nacional de Exportadores de Cacao - Ecuador, 2015).

A mediados del siglo XVI España domina el negocio del cacao, promoviendo el desarrollo de regiones económicas y para su cultivo explotaban la mano de obra indígena y de esclavos. En el siglo XVIII Guatemala, Tabasco (México), Venezuela y Ecuador adquieren importancia como zonas de producción. Los jesuitas instauraron su explotación y comercialización en la Nueva Granada, sin embargo, en Colombia su cultivo no se desarrollaba en grandes extensiones. En la década de 1820, los portugueses lo introducen en Ghana y otros países del

centro de África. En el siglo XVI, en la era poscolombina, Hernando Cortés reportó el hallazgo de una bebida amarga usada por los aztecas. Envío las semillas y recetas a Europa dónde tuvo gran aceptación y se posiciona en el mercado por su aroma, suavidad y propiedades, incrementando su demanda y por tanto su producción en las fértiles tierras de las colonias españolas en esa época (Tovar, 2000; Ploetz, 2007; De Almeida y Valle, 2008; Girón *et al.*, 2012; Asociación Nacional de Exportadores de Cacao - Ecuador, 2015).

En el siglo XVI la tercera parte de la producción mundial de cacao era consumida por los españoles y es por esa época que empieza la expansión del cultivo en Brasil. Durante el siglo XIX, las recetas originales se perfeccionaron y se desarrollaron las tecnologías que facilitaron el tostado y molienda de los granos de cacao, con lo cual se originó el desarrollo de la industria del chocolate y se popularizó su consumo en el mundo. A finales del siglo XIX, los suizos producen el primer chocolate con leche, los chocolates suizos conquistan el mercado internacional, dando origen a la industria que se conoce al presente. En la actualidad, el cultivo del cacao se encuentra en una estrecha zona tropical húmeda, delimitada por los trópicos de Cáncer y Capricornio (Tovar, 2000; Ploetz, 2007; De Almeida y Valle, 2008; Girón *et al.*, 2012; Asociación Nacional de Exportadores de Cacao - Ecuador, 2015).

7.1.2 Variedades de cacao

La Organización Internacional del Cacao (ICCO, 2013) indica que existen tres categorías de cacao:

Criollo. Se desarrolló en una zona que abarca desde el norte del Ecuador, Colombia, Venezuela, Centroamérica hasta las selvas tropicales de México. Se caracteriza porque las mazorcas tienen coloraciones verdes y rojizas en estado inmaduro y se tornan amarillas y naranja-rojizas, respectivamente, cuando están maduras. Este cacao al ser domesticado y adaptado a diferentes zonas o regiones del planeta, ha sido el más susceptible a enfermedades, el menos vigoroso y de menor productividad. Por esta razón, cuando el “mal de machete” (*Ceratocystis fimbriata*) se expandió por el continente americano, este genotipo de cacao casi desaparece, especialmente en Panamá, Costa Rica y Nicaragua (Wood, 1975; Toxopeus, 2001; Enríquez, 2004).

Forastero amazónico. Se denomina así ya que se refiere al germoplasma de la cuenca alta y baja del río Amazonas en Ecuador, Colombia, Perú, Venezuela y Brasil, desde dónde se

dispersó al África, sudeste asiático y Oceanía. Es el cacao mayormente cultivado en el mundo, ya que cerca del 80% de la superficie cacaotera mundial está sembrada con este tipo de cacao. Este tipo de cacao es más resistente, productivo y vigoroso que el criollo. La coloración de las mazorcas es verde en estado inmaduro y amarillo en estado maduro (Toxopeus, 2001; Enríquez, 2004). Se caracteriza por la acidez del grano, el tamaño pequeño de la almendra y su sabor amargo. Recién sacado de la mazorca el cotiledón tiene una coloración violeta y se oscurece luego del aprovechamiento o beneficio, características que no lo hacen deseable por la industria (Rodríguez y Medina, 2005; Llor et al., 2009).

Trinitario. Surgió por hibridación natural entre árboles criollos y forasteros amazónicos en la isla de Trinidad, desde dónde se dispersó a Venezuela, Colombia y otras partes del mundo. De este cruce heterogéneo se presentan diversidad de formas intermedias de mazorcas al igual que su coloración, hallando tonos verdes y rojizos, e inclusive una mezcla de ambos (Pound, 1931; Cheesman, 1944; Yang et al., 2013). Las semillas son de un tamaño mayor a las del cacao criollo o forastero, el tronco es grueso y las hojas grandes (INIAP, 1993). Este material es considerado de élite por su calidad, resistencia a enfermedades y adaptación, por tanto, a partir de este se han seleccionado la mayoría de las variedades de cacao que se explotan en el mundo (Enríquez, 2004).

El cacao colombiano se originó en la franja del bosque tropical, occidente de la cordillera de los Andes, entre Colombia y Ecuador, especialmente en la región del río Guayas arriba. Corresponde a un grano bastante grande de cotiledón recién extraído de la mazorca y de color castaño claro. El grano tiene una demanda particular en el mercado europeo por su sabor denominado “arriba” (Pinzón y Rojas, 2004).

Los materiales disponibles son clones o híbridos. Los clones son materiales genéticamente uniformes, que se derivan de un solo individuo y, por tanto, se propagan por reproducción vegetativa. La reproducción vegetativa tiene importancia especial en la cacaocultura, porque la composición genética (genotipo) de la mayoría de los clones, es altamente heterocigoto y las características que distinguen a estos materiales se recombinan y algunas no se expresan al propagarlos por semilla (Cote y Jiménez, 2005). Los híbridos son tipos de cacao que resultan del cruzamiento de dos clones que han sido seleccionados mediante un proceso de estudio bastante prolongado de sus características. De acuerdo con Cote y Jiménez (2005), algunas de

las principales características deseables en los híbridos son su precocidad, alta producción y tolerancia a enfermedades y plagas.

7.2 IMPORTANCIA Y LIMITANTES DEL CULTIVO DE CACAO

7.2.1 Importancia social

A nivel mundial cerca del 80% del cacao es producido por pequeños agricultores, proporcionando empleo a muchas comunidades rurales (Vos *et al.*, 2003). En Colombia la mano de obra que demanda el cultivo del cacao es aportada principalmente por la familia y en algunas oportunidades se contratan jornales o mano de obra especializada en labores específicas para el desarrollo del cultivo, como injertación, podas o cosecha. Esta característica hace que su cultivo sea un importante generador de empleo tanto directo como indirecto (Rojas y Sacristán, 2013). Espinal *et al.* (2005), señalan que el 2003 el cultivo de cacao requirió 50.854 empleos para cosechar un área de 99.975 hectáreas, superando la demanda de mano de obra de otros cultivos de importancia en el país.

En muchos casos estas zonas también corresponden a regiones que presentan problemáticas sociales tales como pobreza, desempleo y violencia. Por lo anterior se han ejecutado convenios interinstitucionales con entidades tanto públicas como privadas del orden nacional e internacional, que han beneficiado especialmente a los nuevos cacaocultores y proyectos de siembras nuevas (Rojas y Sacristán, 2013).

Estos proyectos han contribuido no solo a mejorar las condiciones de vida de las familias con el cultivo del cacao y sus especies acompañantes, sino que, además, algunos de sus beneficiarios han recibido capacitación en temas como seguridad alimentaria y saneamiento básico y las organizaciones campesinas han sido formadas y acompañadas en el componente asociativo, contable y de comercialización. También se ha brindado capacitación técnica a los cacaoteros con la finalidad de que sus proyectos productivos sean sostenibles en tiempo y el espacio. En muchas zonas que presentan problemas de orden social y hay presencia de cultivos de uso ilícito, se ha logrado la reconversión de su enfoque productivo y, por tanto, la vida de muchas familias rurales, que hoy viven principalmente del cultivo del cacao (Rojas y Sacristán, 2013; Oxford Business Group, s.f).

7.2.2 Importancia económica

La Federación Nacional de Cacao (Fedecacao) reportó que en el 2013 la producción de cacao aumentó un 12% en Colombia, alcanzando las 47.000 toneladas, frente a las 42.000 toneladas del año anterior (Oxford Business Group, s.f). Desde el año 2011 cuándo Colombia empezó a exportar se ha registrado un crecimiento estable. Además, con la demanda creciente y el déficit proyectado por la Organización Internacional del Cacao (ICCO, 2016a), la producción de cacao en Colombia recibirá atención especial en los próximos años. Gracias a los diferentes convenios y proyectos ejecutados por Fedecacao y los realizados por otras entidades se han logrado cuantiosas inversiones. Sin embargo, se presentan limitaciones relacionadas con la estructura del mercado, la baja competitividad, los bajos niveles de adopción de tecnología, las precarias condiciones sociales de los productores y la fluctuación del precio, el contrabando y la evasión, que contribuyen a un equilibrio económico frágil. Por tanto, el gobierno ha manifestado el incentivo a proyectos de inversión dirigidos a mejorar la competitividad, reducir el riesgo y garantizar una producción agrícola sostenible (Rojas y Sacristán, 2013; Oxford Business Group, s.f).

7.2.3 Importancia ambiental

El cacao es una especie primordial en la agricultura colombiana, siendo parte de sistemas agroforestales campesinos. Es considerada una planta reforestadora porque convive en equilibrio con una amplia diversidad de flora y fauna, siendo considerada un componente importante en los agroecosistemas (Jaimes y Aránzazu, 2010).

La ubicación estratégica de muchas plantaciones de cacao en zonas con una alta presión sobre los ecosistemas por actividades como la deforestación, la minería y los cultivos de uso ilícito, en gran parte hacen que sea un sistema productivo apto para la preservación de muchos hábitats para importantes especies de flora y fauna. El cacao se cultiva principalmente en un medio agro-forestal semi-natural y, por lo tanto, es un hábitat particularmente rico y estable para muchas especies, beneficiando la biodiversidad (Vos *et al.*, 2003). Estos sistemas contribuyen con la conservación del suelo y el ambiente debido a que son productores de biomasa, capturan dióxido de carbono y liberan oxígeno (Davila, 2014).

Rojas y Sacristán, (2013), indican que el cacao es un cultivo beneficioso para el medio ambiente debido a que se desarrolla, asociado a cultivos de ciclo corto, sombríos temporales y sombríos permanentes. Lo anterior presenta una serie de ventajas tales como: generación de un microclima favorable que permite preservar la biodiversidad, aumenta la productividad vegetal y animal, diversifica la producción, integra la producción forestal con la agropecuaria, disminuye los riesgos del agricultor y mitiga los efectos perjudiciales de la incidencia directa de la luz solar, el viento y la lluvia sobre el suelo.

7.2.4 Limitantes fitosanitarias del cultivo

Siendo un árbol exótico en muchos lugares dónde se produce, ha contraído un número significativo de nuevas enfermedades, que provienen de la flora nativa de estos lugares, con lo que, el cacao no ha co-evolucionado y por tanto no presenta mecanismos de defensa (Vos *et al.*, 2003).

Las enfermedades más significativas son las causadas por hongos como: la escoba de bruja causada por *Moniliophthora perniciosa* (= *Crinipellis perniciosa*) (se observa especialmente en América del Sur), la monilia producida por *Moniliophthora roreri* (se presenta principalmente en el centro-norte de América del Sur) y la pudrición negra, causada por varias especies de *Phytophthora* que se distribuyen a través de los trópicos (Hebbar, 2007).

En Colombia la investigación fitosanitaria del cacao ha sido relegada desde los años 90, al no considerarse un sistema de producción en crecimiento. Se realizaron algunos estudios de evaluación de tolerancia a monilia (Cárdenas y Giraldo, 1986; Arguello, 1997), pero no son suficientes. Las metodologías empleadas no permiten resultados precisos para caracterizar los materiales de cacao por resistencia a monilia (Rodríguez y Medina, 2005).

7.3 LA MONILIA *Moniliophthora roreri* H.C. Evans *et al.* (1978)

La monilia (*M. roreri*) es la enfermedad más limitante en el cultivo de cacao, debido a que es más destructiva que la vaina negra (*Phytophthora* spp.) y más peligrosa y difícil de controlar que la escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*). Esto se debe a su agresividad, su capacidad de sobrevivir a diferentes condiciones ambientales, rápida dispersión y la

susceptibilidad de la mayoría de los genotipos comerciales de cacao (Phillips-Mora, 2003; Phillips-Mora y Wilkinson, 2007).

Existen muchos nombres comunes para la enfermedad de acuerdo con la región dónde se produce, tales como: moniliasis o monilia, enfermedad de Quevedo, mancha ceniza, podredumbre acuosa, helada, prinque o mal palúdico (Campuzano, 1980).

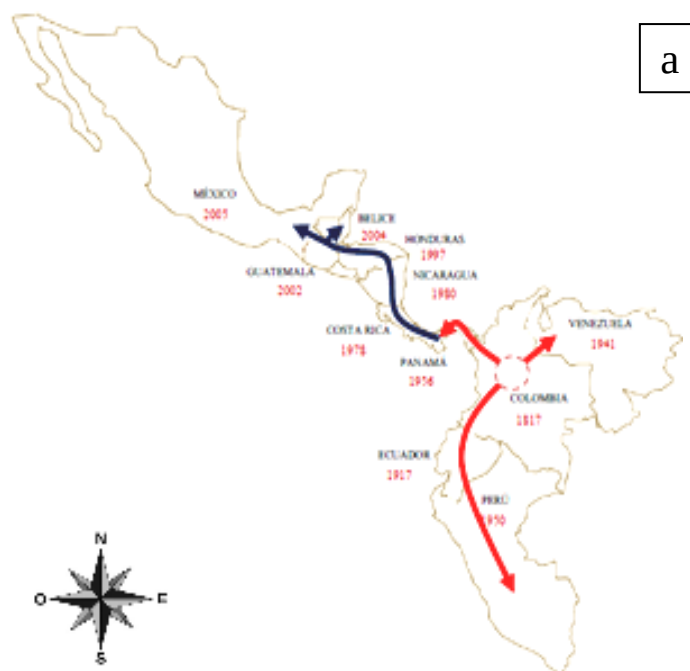
7.3.1 Origen y distribución de la monilia.

Ecuador fue considerado inicialmente el centro de origen, Sin embargo, (Phillips-Mora, 2003) demostró mediante estudios de genética poblacional y marcadores moleculares que la región geográfica del noroeste de Colombia contiene la mayor diversidad genética, por lo que sería, con mayor probabilidad, el centro de origen.

La distribución está restringida a América (Phillips-Mora *et al.*, 2007) donde ha sido reportado en 11 países comenzando en Colombia en 1817 (Phillips-Mora, 2003; Phillips-Mora y Wilkinson, 2007), Ecuador en 1918 (Rorer, 1918), Venezuela en 1941 (Muller, 1941) y Perú en 1950 (McLaughlin, 1950). La aparición de *M. royeri* en Panamá en 1956 (Orellana, 1956) marcó la expansión significativa del rango de distribución del hongo y su dispersión a través de Mesoamérica (Phillips-Mora y Wilkinson, 2007). Durante los últimos 50 años *M. royeri* se dispersó más de 2500 km abarcando seis países: Costa Rica en 1978, Nicaragua en 1980, Honduras en 1997, Guatemala en el 2002, Belice en el 2004 y México en el 2005 (Phillips-Mora *et al.*, 2006), alcanzando así el límite norte del cultivo del cacao en el continente americano (Figura 1a). Se debe señalar que en México la dispersión a la posición más al norte que se conoce se produjo en un salto de aproximadamente 400 km. Posteriormente regresa al sur de Chiapas (Tapachula), cercano a la frontera sur-oeste de Guatemala. La forma en que se dispersó la monilia de cacao hacia México y al interior del territorio mexicano, sustenta la teoría de que este evento fue mediado por el hombre (Torres de la Cruz, 2010).

Phillips-Mora (2003) indica que en Colombia la monilia pudo haber aparecido en el nordeste del departamento de Santander y después (1851) en el centro del departamento de Antioquia. Actualmente el patógeno se encuentra al menos en seis departamentos de Colombia con alta incidencia, incluyendo los fronterizos con Ecuador, Venezuela y Panamá (Figura 1b). La mayor agresividad del patógeno en zonas de mayor producción y el inadecuado manejo de la

enfermedad, ponen en riesgo el potencial genético de los materiales que aún presentan algún tipo de resistencia (Correa *et al.*, 2014).



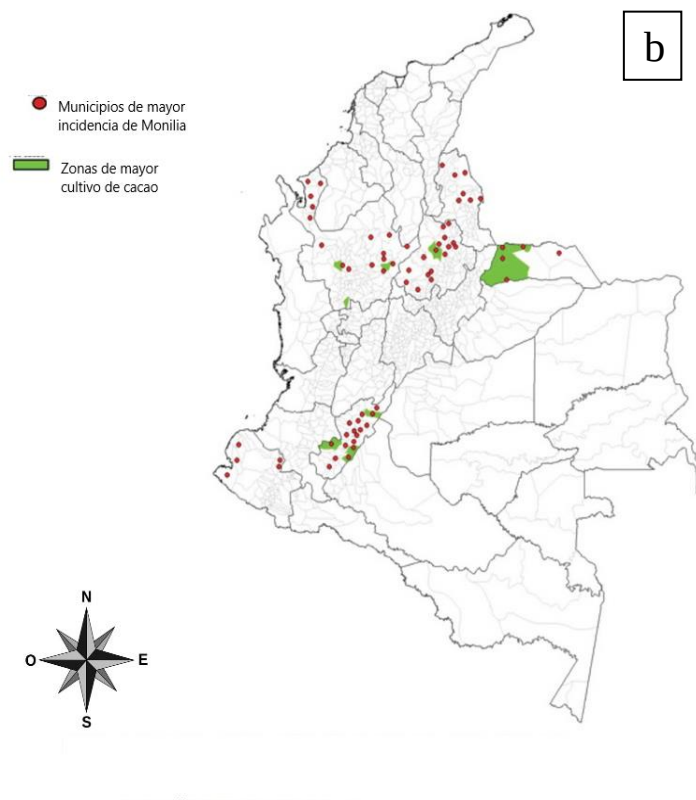


Figura 1. Distribución de *M. roreri* en: a) Centro y Suramérica y b) Colombia. Tomado de Torres de la Cruz (2010) y Correa *et al.* (2014).

7.3.2 Taxonomía de *M. roreri*

El agente causal de la monilia fue originalmente descrito y clasificado por Ciferri y Parodi, (1933), sin embargo, Evans *et al.* (1978) observaron que el hongo presentaba características típicas de Basidiomicetes, por lo tanto, propusieron su agrupación dentro de esta clase y crearon el nombre *Moniliophthora roreri* para denominarlo. Evans *et al.* (2002), basados en evidencia molecular y citológica, señalaron que el hongo está estrechamente relacionado con el patógeno de la escoba de bruja (*C. perniciosa*), pero no corresponde a su estado anamorfo.

Phillips-Mora (2003), mediante técnicas moleculares confirmó que el hongo es un Basidiomicete perteneciente al orden Agaricales. Evans *et al.* (2003) realizaron análisis genéticos y lo clasificaron formalmente en el género *Crinipellis*, por tanto, determinaron el nombre *Crinipellis roreri* con dos variedades según el tipo de hospedero: *C. roreri* var. *gileri*, patógeno en *Theobroma. gileri* y *C. roreri* var. *roreri* en *Theobroma cacao*.

En esta tesis se seguirá la clasificación de National Center for Biotechnology Information (NCBI, 2016) que lo ubica como *Monilioththora roreri* ((Cif.) Evans *et al.*). Sinonimia: *Crinipellis roreri* var. *roreri*.

7.3.1 Características del hongo

Las características morfológicas y de crecimiento de *M. roreri* muestran alta variabilidad ya que exhibe alta plasticidad fenotípica. Sus hifas son hialinas, de pared delgada y septadas, las conidias tienen pared gruesa, son fácilmente removibles, tienen forma globosa, elíptica o amorfa y su micelio vegetativo posee tabiques con doliporos (Evans, 1981; Phillips-Mora, 2003; Lozada *et al.*, 2012). Se ha demostrado que las conidias funcionan como meiosporas, señalando que representan un basidio muy modificado, con el pseudostroma grueso y carnoso (Evans, 2007). Las esporas se forman basípetamente en cadenas simples o ramificadas cada una con 4-10 conidias envueltos en la pared celular original (Ram, 1989; Thévenin y Trocmé, 1996). Campuzano, (1981) indica que como respuesta a temperatura extremas, se puede presentar un incremento en el tamaño de las esporas y engrosamiento de la pared.

M. roreri se considera un hongo hemibiótrofo, dado que su ciclo pasa por una fase biotrófica, desde la germinación de los conidias hasta la invasión intercelular de la epidermis de las mazorcas; y una fase necrótica, que se da cuando disminuye el crecimiento de la mazorca y el hongo invade las células provocando la aparición de necrosis interna y externa (Evans *et al.*, 1978; Thévenin y Trocmé, 1996).

7.3.2 Ciclo de vida y su dispersión

La enfermedad ha sido reportada a una altitud entre 0 y 1520 msnm, zonas con precipitación anual de 780-5.500 mm y 18 a 28 °C de temperatura. Bajo condiciones de exceso de sombra y poca aireación se favorece la frecuencia e intensidad de aparición de la enfermedad. Sin embargo, las condiciones que favorecen la germinación y la penetración del hongo, son diferentes a las que favorecen la liberación y la diseminación del inóculo (Phillips-Mora, 1986).

Las mazorcas contaminadas o momificadas que no son removidas de los árboles o se dejan en el suelo como residuo representan la mayor fuente de inóculo del hongo (Castaño, 1952;

Ampuero, 1967). Una mazorca adulta infectada puede producir hasta 7.000 millones de esporas y 44 millones de conidias/cm² (Campuzano, 1980, 1981). Luego las conidias son diseminadas por el viento y la lluvia, pudiendo contaminar frutos o mazorcas de una plantación a otra (Navarro y Mendoza, 2006). Albuquerque *et al.* (2005), sugieren que la diseminación de las conidias es realizada por el viento principalmente, pudiendo el agua de lluvia tener un papel importante en las infecciones a corta distancia en la copa del cacao, o a larga distancia si se acompañan de vientos fuertes. Además, el movimiento producido por las labores de cosecha facilita el movimiento de las conidias en el aire y bajo condiciones propicias de humedad y temperatura, infectan constantemente los frutos que recién están formándose (Amores *et al.*, 2009) (Figura 2). Los insectos también pueden diseminar las conidias ya sea que se adhieran a su cuerpo o las ingieran (Phillips-Mora, 2003). Meléndez (1993), indica que la mayor cantidad de conidias se encuentran a 1 m de altura en las plantas de cacao.

Una vez liberadas, las conidias pueden mantenerse viables en el tronco, hojas, flores y cualquier otra parte del árbol de cacao o los árboles de sombra (Ram, 1989). Las conidias que caen al suelo no sobreviven un largo periodo, debido a la acción de los microorganismos del suelo, el sol y el viento (Phillips-Mora, 2003).

En condiciones húmedas y temperatura superior a 24 °C las conidias germinan, en un lapso entre 6 y 8 horas y penetran el fruto con uso de hifas infectivas (Merchán, 1981; Phillips-Mora *et al.*, 2006). Su penetración ocurre directamente a través de los estomas, creciendo entre las células del córtex, produciendo conidias dentro y en la superficie de los frutos (Albuquerque *et al.*, 2005). Las hifas se dirigen a los tejidos centrales para inducir proteínas relacionadas con el necrosamiento y que presentan identidad con las halladas en *M. pernicioso* (García *et al.*, 2007). Una de las características del patógeno es su largo período de incubación antes de aparecer los síntomas (Johnson *et al.*, 2008). El tiempo de infección puede ser de 3 a 8 semanas, pudiendo variar según la edad del fruto, la severidad del ataque, la susceptibilidad del árbol y las condiciones de clima, principalmente presencia de lluvias.

En la cosecha se extraen las almendras de las mazorcas, pero se dejan las cáscaras en el suelo y algunos frutos enfermos en la planta, lo que favorece la sobrevivencia del patógeno y el inicio del ciclo (Sánchez y Garcés, 2012). El ciclo de vida en condiciones de campo tiene una duración promedio de 68 a 74 días, desde que las conidias se depositan en la superficie de la

mazorca y la esporulación (Ruiz, 2016). En las mazorcas que permanecen adheridas a la planta, el patógeno permanece en estado de conidias y en las mazorcas momificadas, produce varios ciclos de esporulación, hasta por periodos mayores a nueve meses (Evans *et al.*, 1978; Jiménez, 1986).

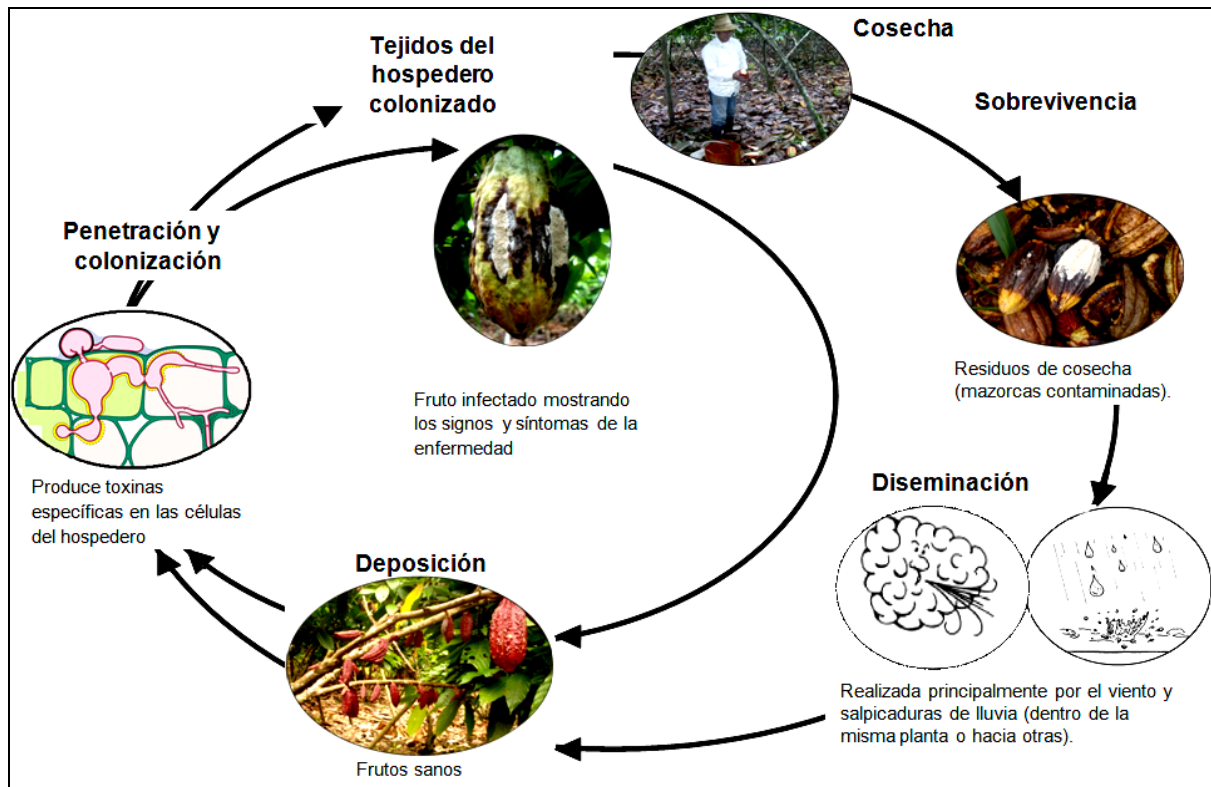


Figura 2. Ciclo de vida de *M. royeri*. Tomado de Sánchez y Garcés (2012).

7.3.3 Síntomas de la enfermedad

Síntomas externos e internos como: maduración prematura, hipertrofias, deformaciones, manchas, micelio y secamiento (Evans, 1981; Evans *et al.*, 2002; Phillips-Mora y Wilkinson, 2007) (Figura 3). La infección ocurre generalmente en frutos jóvenes y se desarrolla una necrosis internamente mientras el fruto crece y posteriormente se evidencian los síntomas externos (Suárez, 1971).

Síntomas externos. Los síntomas varían con la edad del fruto al momento de la infección, siendo más susceptibles cuando son jóvenes y son más tolerantes conforme maduran (Ampuero, 1967; Amores *et al.*, 2009). En frutos menores de 20 días de edad se produce un desecamiento similar al ocasionado por otras enfermedades (Phillips-Mora, 2003). Sin

embargo, algunos frutos menores de dos meses pueden estar infectados sin mostrar síntomas externos durante su crecimiento y luego presentar protuberancias a manera de *jiba* o jorobas y manchas claras en el exocarpo (Figura 3). Es frecuente que algunos frutos enfermos presenten madurez prematura, que se manifiesta con un cambio de color en las mazorcas dando la apariencia de madurez (Ampuero, 1967; Campuzano, 1980; Phillips-Mora, 2003) (Figura 3E). Otros síntomas son la aparición de pequeñas áreas aceitosas (Figura 3D), usualmente difíciles de detectar hasta que incrementan en tamaño para formar una mancha de color marrón oscuro de borde irregular también llamada *mancha chocolate* (Phillips-Mora, 2003) (Figura 3F) que puede dañar a todo el fruto (Figura 3B). Cuatro a ocho días después, el fruto se cubre con un micelio blanco (Figura 3C) y abundante esporulación del patógeno tornándose de color oscuro debido a la maduración de esporas (Figura 3G).

En otros casos se pueden presentar pequeños puntos aceitosos que se unen y forman una mancha café e irregular, puntos necróticos marrón oscuro y manchas oscuras limitadas, ligeramente hundidas, con frecuencia rodeadas de halos de maduración prematura (color amarillo) (Phillips-Mora, 2003). En semanas subsecuentes a la esporulación, el fruto pierde agua y progresivamente se momifica (Figura 3H) (Suárez, 1971). Los frutos de más de tres meses de edad, pueden presentar daño en el epicarpio sin que alcance las almendras (Amores *et al.*, 2009).

Síntomas internos. Los frutos juveniles infectados (7 a 10 cm de longitud) presentan alteración en el número y desarrollo de los granos (Evans, 1981). Los frutos infectados después de los tres meses de edad pueden mostrar necrosis de color marrón rojizo que afecta a algunas o todas las semillas (Figura 3I). Cuando la infección está avanzada, como resultado de la descomposición, los carpelos, la pulpa y granos forman una sola masa compacta envuelta por una sustancia acuosa (Rorer, 1918) (Figura 3J). Estos síntomas internos pueden ser más graves que los externos ya que provocan la pérdida total de las almendras sin importar la edad del fruto (FHIA, 2003)

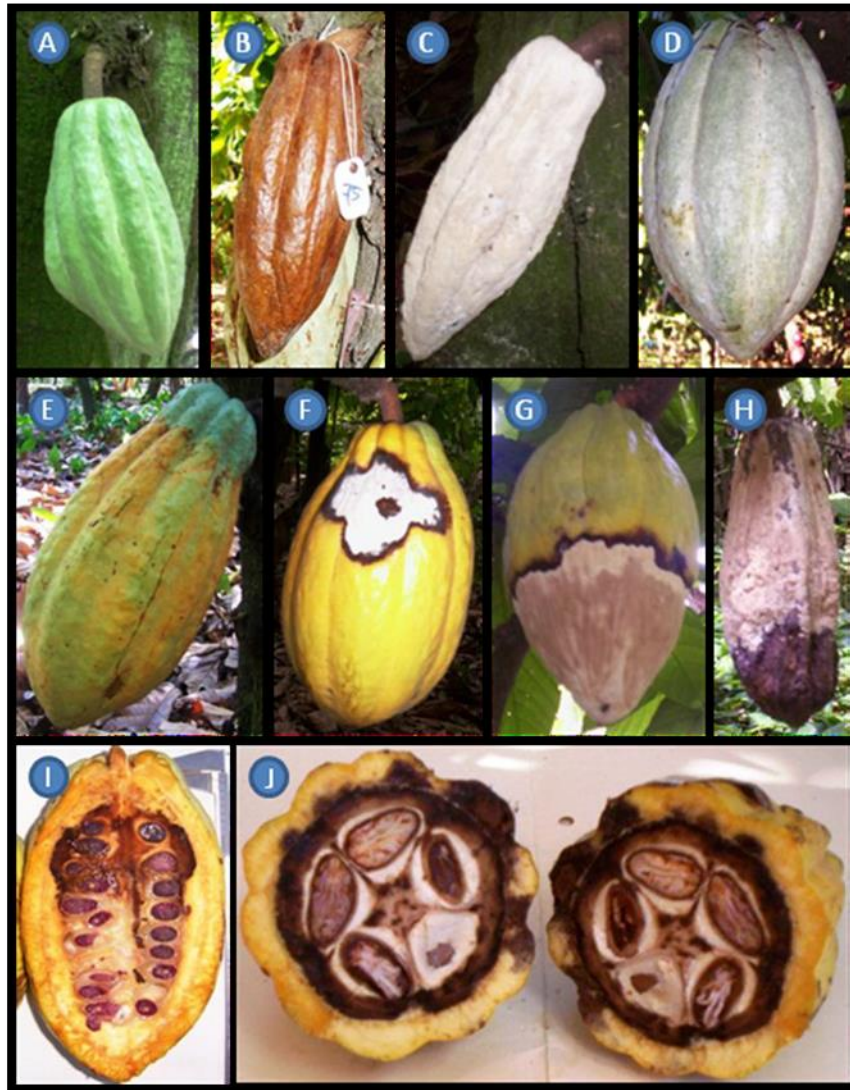


Figura 3. Sintomatología externa (A – H) y sintomatología interna (I – J) de *M. roreri* en cacao. Tomado de Sánchez y Garcés (2012).

7.3.4 Desarrollo de la enfermedad

Las condiciones ambientales son fundamentales en el desarrollo de *M. roreri*. El ciclo inicia en el momento que la humedad ambiental es baja (época seca) cuándo se generan millones de esporas. La germinación de los conidios se da en ambientes húmedos a temperaturas superiores a 24 °C, en un lapso de 6 a 8 horas (Albuquerque *et al.*, 2005). Torres de la Cruz (2010) evaluó el progreso temporal de monilia en Tabasco (México) en el periodo 2008-09, encontrando que las epidemias se asociaron a temperaturas de 20 a 26.9 °C y humedad relativa mayor a 90%, 49 días antes de la aparición de los síntomas. La densidad de conidias

en el aire se asoció positivamente con temperaturas superiores a 35 °C y humedad relativa menor a 60%, esto es, que la mayor densidad se presentó en la época seca.

Las épocas de alta precipitación se relacionan con períodos de alta incidencia de la enfermedad. En zonas con precipitación acumulada mayor a los 2500 mm y registros de humedad relativa superior al 90%, la incidencia puede alcanzar valores mayores al 95%. Sin embargo, existe probabilidad de que las lluvias torrenciales generen un efecto negativo sobre el desarrollo de la enfermedad (Castro, 1989).

La temperatura es el factor de mayor influencia en la tasa de crecimiento de los hongos (Moore-Landecker, 1996). Su incremento provoca el aumento de la actividad enzimática y química, por lo que se acelera la síntesis de vitaminas, aminoácidos y metabolitos; sin embargo, una temperatura excesiva puede inactivar dichas actividades y detener el crecimiento. Para *M. roreri*, el rango ideal para el crecimiento y esporulación *in vitro* en medio de cultivo V8 es de 24 a 28°C (Herrera, 1988). La temperatura favorable al desarrollo de la enfermedad se presenta entre 22 y 30°C (López *et al.*, 2006). La germinación de las conidias es favorecida por temperaturas medias de 22°C y humedad relativa cercana al 93% (Albuquerque *et al.*, 2005; Phillips-Mora *et al.*, 2006; Sánchez y Garcés, 2012).

De acuerdo con Tazelaar (1991), el ciclo de *M. roreri* se puede describir como un proceso policíclico homogéneo construido sistemáticamente, ya que sus ciclos de infección son idénticos que suceden generalmente entre las 10:00 y las 14:00 horas aproximadamente. Enríquez (1982) señala que las esporas de *M. roreri* pueden desplazarse a favor de las corrientes de hasta 30 metros en aire y en sentido contrario unos 20 metros.

Las esporas del patógeno se desprenden por acción de las corrientes de aire, el agua o movimientos en el árbol y son desplazadas por las corrientes conectivas de aire.

Se considera que la humedad relativa óptima para el crecimiento del hongo debe ser superior al 80% (Suárez, 1980; Castro, 1989). Campuzano (1981) encontró que el mayor porcentaje de germinación *in vitro* se produce a 96% de humedad. Sin embargo, para la dispersión de conidias de *M. roreri*, es necesario que la humedad relativa esté entre 71% y 74%, para que las estructuras puedan desprenderse de los frutos y sean transportadas por el viento u otro medio de diseminación.

Para que las esporas germinen y desarrollen el tubo germinativo se requiere de una película de agua sobre el fruto. La intensidad y cantidad de horas luz influyen en la tasa de crecimiento y la formación de estructuras reproductivas. Esto se evidencia en la formación de anillos alternos concéntricos al exponerse a períodos alternos de luz y oscuridad. La formación de estructuras reproductivas (anillos pardo claros de crecimiento rastrero) y la oscuridad favorece al desarrollo vegetativo (anillos color crema, menos esporulados y de crecimiento más aéreo) (Leandro, 2011). A pesar de esto, Phillips-Mora (2003) observó la formación de anillos concéntricos en cultivos mantenidos en total oscuridad. También logró estimular el desarrollo de las hifas y estructuras vegetativas del mismo en placas de Petri, mantenidas a 24 °C con periodos alternos de luz y oscuridad de 12 horas. Herrera (1988) determinó que el régimen lumínico de 12 horas de luz permite alcanzar el punto máximo de esporulación de las colonias en un medio V8.

En Colombia (Granja Luker a 1.050 msnm), se demostró que los primeros síntomas aparecen en promedio a los 22 días y la esporulación a los 73 días después de la inoculación del patógeno (Merchán, 1981). Una mazorca esporulada ubicada a una altura aproximada de dos metros tiene un gradiente de dispersión de hasta 20 m, con capacidad de infección de 40% (Merchán, 1981). Existe una correlación significativa y positiva entre la población de conidias en el aire y la temperatura y negativa con respecto a la humedad relativa (Porrás, 1982).

8. Sistemas de pronóstico de enfermedades basados en el ambiente

Krause y Massie (1975) reconocieron dos tipos de métodos para desarrollar estos sistemas de pronóstico: a) **fundamental** o inductivo y b) **empírico** o deductivo. El método fundamental utiliza información generada en experimentos (de laboratorio, en cámara con ambiente controlado, en invernáculo o a campo) para describir la influencia ambiental sobre uno o más aspectos de la interacción hospedante-patógeno. Frecuentemente se evalúa el efecto de la duración de mojado y temperatura sobre uno o pocos componentes del ciclo de la enfermedad, visualizando la relación en tablas y gráficos o ajustando ecuaciones. A veces las relaciones ambiente-patógeno establecidas bajo condiciones controladas de laboratorio pueden modificarse a campo (debido a cambios en la disponibilidad de inóculo, nutrientes, microflora, edad de las hojas y condición fisiológica). Los sistemas de pronóstico desarrollados por el método empírico o deductivo surgen del análisis de datos actuales e históricos de registros de la enfermedad y de las condiciones ambientales en un área geográfica específica. Esto resulta en la formulación de reglas que predicen el desarrollo de la enfermedad, por ejemplo, las establecidas para el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) por Hyre (1954). Bajo este enfoque empírico, la técnica de regresión lineal múltiple es la más utilizada en el campo de la fitopatología para establecer la relación existente entre la enfermedad (variable dependiente) y variables independientes (en muchos casos meteorológicas), con los parámetros estimados por el método de mínimos cuadrados. Sin embargo, en los últimos años, la técnica de regresión logística ha sido muy usada para predecir niveles de ocurrencia de complejos fúngicos/micotoxinas (Paul y Munkold, 2004; Moschini *et al.*, 2006; Henderson *et al.*, 2007; Harikrishnan y Del Río, 2008; Martínez *et al.*, 2010; Carmona *et al.*, 2010; Moschini *et al.*, 2014b; Sancho *et al.*, 2018).

La regresión logística, y la función logit como nexo, ajusta modelos lineales de regresión que relacionan la probabilidad de la variable respuesta dicotómica: presencia/ausencia de enfermedad u ordinal: nivel de enfermedad: ligero, moderado, severo) con variables independientes. El supuesto de normalidad multivariada no es requerido para que la regresión logística sea válida. De acuerdo a Coakley (1988), un mínimo de 8-12 años de observaciones de la enfermedad en lotes de cultivo son suficientes para identificar los factores meteorológicos asociados y cuantificar sus efectos mediante el ajuste de modelos predictivos.

Si esto no fuera posible, se podría utilizar información meteorológica y de la enfermedad de varios sitios pertenecientes a una región geográfica, de manera de obtener variabilidad.

Mills (1944) desarrolló el primer modelo de pronóstico publicado. Este modelo es utilizado para predecir la aparición del moteado (*Venturia inaequalis*) en manzano, permitiendo la reducción del número de aplicaciones con productos de síntesis química (Llorente y Montesinos, 2004).

Del Ponte *et al.* (2006) ajustaron modelos de regresión lineal basados en variables hídricas para predecir la severidad final de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) en soja (*Glycine max*) utilizando datos de porcentaje de severidad de sólo 3 campañas, pero de 34 experimentos de campo, en 21 sitios de Brasil. Moschini *et al.* (2006), utilizaron observaciones de incidencia de escudete negro (*Alternaria alternata* y *Bipolaris sorokiniana*) en trigo fideo de 5 sitios y 3 campañas para ajustar modelos predictivos de regresión lineal múltiple y logística basados en dos variables meteorológicas.

Moschini *et al.*, (2014a), analizaron tres modelos de regresión logística para la detección de *Alternaria tenuissima* en arándanos, basados en observaciones de severidad a lo largo del ciclo de cultivo. El modelo relacionó el grado de senescencia de la hoja, la frecuencia de lluvias y la interacción de la temperatura mínima media y la frecuencia de lluvias. Todos estos modelos desarrollados bajo un enfoque empírico tratan de explicar la variación de la enfermedad a través de variables meteorológicas que captan la variabilidad del clima local, en un intervalo temporal de corta duración (Moschini *et al.*, 2014b).

9. Cuantificación del efecto de las condiciones meteorológicas y de la susceptibilidad de los clones sobre los niveles de incidencia de monilia

9.1.1 Área De Estudio

La información meteorológica analizada corresponde al Municipio de San Vicente de Chucurí, ubicado al centro occidente del Departamento de Santander (Colombia), enmarcado entre las coordenadas planas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) así: Norte: 1'226.000 a 1'283.000 y Este: 1'036.000 a 1'083.000. En el municipio la temperatura media máxima mensual es de 30,7 °C, correspondientes a los meses entre febrero y marzo los mayores valores y temperatura media mínima mensual de 19,5 °C correspondientes a los meses entre agosto y octubre. Precipitación media anual de 910 mm, según la base de datos de la Estación San Vicente de Chucurí con código [24055070] del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), ubicada a 721 msnm en las coordenadas 6,82339 N y 73,47206 W.



Figura 4. Ubicación San Vicente de Chucuri, Departamento de Santander, Colombia.

9.1.2 Análisis de la Incidencia de monilia observada

Para este trabajo fueron analizados registros mensuales del total de mazorcas de cacao con síntomas de monilia y el total de mazorcas cosechadas para seis clones: CCN-51, EET-8, FLE-2, FLE-3, ICS-39 e ICS-60, en el lapso 2005 – 2011. Estos registros de la enfermedad fueron realizados por Fedecacao en dos sitios del Departamento Santander: La Cabaña y Chimita, distantes 50 km al Norte y NE de la estación meteorológica de San Vicente de Chucurí, respectivamente.

En el lapso 2005-2011, por sitio, mes y clon se calculó el valor correspondiente de incidencia (Inc%) de monilia:

$$\text{Inc\%} = \text{N}^\circ \text{ mazorcas cosechadas con síntomas} / \text{N}^\circ \text{ total de mazorcas cosechadas} * 100$$

Por sitio se realizó un análisis de varianza con el procedimiento GLM (SAS) (Campbell y Madden, 1990), para observar la significancia de los efectos Año, Mes y Clon sobre la incidencia (Inc%) de monilia. Para La Cabaña y Chimita se analizaron 462 y 474 valores de Inc%, respectivamente. En ambos sitios, los efectos Año, Mes y Clon fueron significativos al 5%. los valores mensuales de incidencia fueron calculados con un número muy variable de mazorcas totales cosechadas, afectando la comparación de los valores de Inc%. Para reducir esta limitación y a la vez mantener un alto número de valores de Inc% para analizar, en ambos sitios se realizó un nuevo análisis de varianza sobre los valores de Inc% que observaron mazorcas cosechadas totales superiores al valor del percentil 25% de mazorcas totales (> a 56 y > a 40 mazorcas totales cosechadas en La Cabaña y Chimita, respectivamente). El efecto Año y Mes fue significativo al 1% en ambos sitios. El efecto Clon fue significativo al 1% ($\text{Pr}>\text{F}: <0,01$) en La Cabaña. En Chimita el efecto Clon no fue altamente significativo ($\text{Pr}>\text{F}: <0,10$), no obstante, se siguió adelante con el test de comparaciones múltiples para diferenciar la susceptibilidad de los clones de cacao y verificar si se obtienen resultados similares a los de La Cabaña.

Diferenciación de la susceptibilidad de los clones de cacao a la monilia

El test de comparaciones múltiples de Duncan diferenció al clon FLE-2 como el más susceptible (>Incidencia de Monilia), difiriendo significativamente del clon CCN-51 (<Incidencia de Monilia, más resistente), en ambos sitios, La Cabaña (alfa: 0,01) y Chimita (alfa: 0,06). Esa diferencia estadística en la incidencia de monilia de los clones CCN51

(resistente) y FLE-2 (susceptible) indicó que debían ser empleados para el ajuste de los modelos de regresión logística (incluido como variable discreta). En La Cabaña se dispusieron 84 valores de Inc% de monilia (42 del clon FLE-2 y 42 del clon CCN51), en Chimita se analizaron 66 valores de Inc% (33 para cada clon).

9.1.3 Desarrollo de modelos de regresión logística de respuesta binaria y ordinal

Variable respuesta binaria y ordinal

Para **La Cabaña**, los valores mensuales de incidencia (Inc%) de monilia disponibles para el análisis se codificaron binariamente como 0 (Inc% < 18,155; L: moderado a ligero) y 1 (Inc% ≥ 18,155; S: severo) y ordinalmente como 0 (Inc% < 11,655; L: ligero), 1 (11,655 ≤ Inc% ≤ 18,155; M: moderado) o 2 (Inc% > 18,155; S: severo). Los valores umbrales de incidencia de la enfermedad (18,155 y 11,655) correspondieron a los percentiles 75% y 50% respecto a los 84 valores de Inc% analizados, respectivamente.

Para **Chimita**, los valores mensuales de incidencia (Inc%) de monilia disponibles se codificaron binariamente como 0 (Inc% ≤ 5,28; L: moderado a ligero) y 1 (Inc% > 5,28; S: severo) y ordinalmente como 0 (Inc% < 0,75; L: ligero), 1 (0,75 ≤ Inc% ≤ 6,58; M: moderado) o 2 (Inc% > 6,58; S: severo). Los valores umbrales 5,28, 6,58 y 0,75 correspondieron a los percentiles 70%, 75% y 20% respecto a los 66 valores de Inc% de monilia analizados, respectivamente.

Variables meteorológicas regresoras

La cantidad de registros faltantes de temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa en el periodo de análisis, impidieron su uso para la definición y cálculo de nuevas variables meteorológicas, se tomaron únicamente valores de precipitación para el desarrollo de esta tesis.

A partir de valores diarios de precipitación (Prec, mm) (período 2005 – 2011) registrados en la estación meteorológica automática San Vicente de Chucurí (721 msnm en las coordenadas

6,82339 N y 73,47206 W) se calcularon las siguientes variables meteorológicas para los sitios La Cabaña y Chimita:

- DPrec: cantidad de días con precipitaciones ($Prec > 0,2$ mm) (ambos sitios)
- DPrec12: cantidad de días con precipitaciones > 12 mm ($Prec > 12$ mm) (La Cabaña)
- DPrec8: cantidad de días con precipitaciones > 8 mm ($Prec > 8$ mm) (Chimita)
- DPrec1: cantidad de días con precipitaciones > 1 mm ($Prec > 1$ mm) (ambos sitios)
- PPrec1: número de períodos de dos días consecutivos con registro de precipitación > 1 mm en ambos días ($Prec > 1$ mm en ambos días) (La Cabaña)
- PPrec8: número de períodos de dos días consecutivos con registro de precipitación > 8 mm en ambos días ($Prec > 8$ mm en ambos días) (Chimita).
- PrecAc: precipitaciones diarias ($Prec > 0$ mm) acumuladas (mm) (ambos sitios)

Período crítico susceptible (PCS): las variables meteorológicas descritas se calcularon en lapsos previos a la fecha de cada observación mensual de incidencia (Inc%) de monilia, en ambos sitios. El período crítico susceptible (PCS) se inició 80 días previos al fin de cada mes con observación de Inc%, finalizando 40 días previos del fin de mes (longitud del PCS=40 días).

Variable discreta regresora

El efecto de la susceptibilidad (Susc) se incluyó como variable discreta. Esta se codificó como 0 para el clon resistente CCN-51 o como 1 para el clon susceptible FLE-2 también se analizaron interacciones (producto) entre (Susc) y variables meteorológicas:

- $It1 = \text{Susc} * \text{DPrec12}$ (La Cabaña)
- $It1 = \text{Susc} * \text{DPrec8}$ (Chimita)
- $It2 = \text{Susc} * \text{PPrec1}$ (La Cabaña)
- $It2 = \text{Susc} * \text{PPrec8}$ (Chimita)
- $It3 = \text{Susc} * \text{DPrec1}$ (ambos sitios)

Análisis Estadístico

Proceso iterativo. Los umbrales de las variables meteorológicas descritas previamente y la longitud y posicionamiento del PCS fueron definidos iterativamente maximizando sus correlaciones con los niveles de enfermedad y los índices de habilidad predictiva de los modelos logísticos ajustados. Un programa escrito con el lenguaje del software *Statistical*

Analysis Systems, versión 8.0, SAS Institute, Inc, Cary, NC, USA (SAS) permitió calcular las diferentes variables meteorológicas y realizar el proceso iterativo

Coefficientes de correlación. El procedimiento *Freq* de SAS, fue usado para calcular los coeficientes de correlación no-paramétrica de Kendall Tau-b (r_k) entre las categorías binarias (S y L) y ordinales (S, M y L) de incidencia de monilia y las variables Susc y meteorológicas.

Desarrollo de modelos de regresión logística. se desarrollaron modelos para estimar las probabilidades de ocurrencia de las categorías binarias y ordinales de Inc%. En este estudio, los niveles de Inc% fueron tratados en orden descendente (severo a ligero). El procedimiento *Logistic* del SAS fue utilizado para ajustar modelos de regresión logística a los datos binarios y ordinales de %Inc por el método de máxima verosimilitud.

-Modelos de respuesta binaria: si se asume que p_S es la probabilidad de observar un nivel de incidencia de monilia severo (S), el modelo logístico, con X_1 y IX_1X_2 (interacción) como predictores, puede ser escrito como: $\ln(p_S/1-p_S) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 IX_1X_2$, donde β_0 a β_2 son parámetros y $\ln$ es el logaritmo natural. Resolviendo la expresión $\text{Exp}(\ln(p_S/1-p_S)) / (1 + \text{Exp}(\ln(p_S/1-p_S)))$ se obtiene el valor de p_S . Calculando la diferencia $1-p_S$ se obtiene p_L (probabilidad de observar un nivel de incidencia de monilia ligero).

-Modelos de respuesta ordinal: en este caso, mediante el procedimiento *Logistic*, se ajustaron modelos de regresión de líneas paralelas a datos de respuesta ordinal. El paralelismo de las regresiones fue puesto a prueba mediante un test de Chi cuadrado. Cada modelo logístico ajusta dos ecuaciones, una estima $\ln(p_S/(1-p_S)) = \alpha_S + \beta'x$ y la otra $\ln(p_{Mc}/(1-p_{Mc})) = \alpha_M + \beta'x$, siendo p_S la probabilidad de observar un nivel de Inc% severo (S) y p_{Mc} la probabilidad acumulada mayor o igual a moderado (M), α_S y α_M interceptos, β' el vector de las pendientes y x el vector de las variables regresoras. Resolviendo las expresiones $\text{Exp}(\ln(p_S/(1-p_S))) / (1 + \text{Exp}(\ln(p_S/(1-p_S))))$ y $\text{Exp}(\ln(p_{Mc}/(1-p_{Mc}))) / (1 + \text{Exp}(\ln(p_{Mc}/(1-p_{Mc}))))$, se obtienen p_S y p_{Mc} . Las probabilidades de observar un nivel epidémico M y L resultan de las siguientes dos diferencias: $p_M = p_{Mc} - p_S$ y $p_L = 1 - (p_S + p_M)$.

Reglas de decisión: para los modelos de respuesta binaria, se pronostica el nivel de incidencia de monilia que tiene una probabilidad asociada $\geq 0,5$ (binaria). Para los modelos de respuesta ordinal (S, M o L), el nivel de Inc% pronosticado es aquel que presenta el mayor valor de probabilidad de ocurrencia.

Para ambos tipos de modelos se utilizó el método de selección de variables (meteorológicas derivadas de la precipitación, susceptibilidad de los clones e interacciones)

Stepwise, fijando niveles de significancia *a priori* para entrar y permanecer en el modelo (NSE y NSP respectivamente) inferiores a 0,15. Mediante el procedimiento *Freq* del SAS se confeccionaron tablas de contingencia para calcular el número de casos en los cuales los niveles dicotómicos y ordinales de enfermedad observados coinciden con los predichos. La precisión de predicción de los modelos seleccionados fue calculada como el porcentaje de casos analizados en los cuales hubo acuerdo entre la categoría de Inc% observada y la predicha por el modelo logístico con la máxima probabilidad respecto del total de casos en cada sitio. La habilidad predictiva de los modelos también fue calculada sobre la base del número de pares de observaciones (t) con diferente categoría de salida:

Sitio: La Cabaña (N total=84):

Binário: $21S * 63L = 1323$ pares;

Ordinal: $21S*21M+21M*42L+21S*42L = 2205$ pares

Sitio: Chimita (N total=66):

Binário: $16S*50L = 800$ pares;

Ordinal: $16S*37M+37M*13L+16S*13L = 1281$ pares.

Un par de observaciones de entrada con diferentes respuestas es concordante (o discordante) si el valor ordenado más grande de la respuesta tiene una más alta (o más baja) probabilidad predicha del evento que el más pequeño. Si el par no es ni concordante ni discordante, es un empate. Los índices de correlación Somers`D y Gamma fueron calculados a partir del número de pares de observaciones concordantes (nc) y discordantes (nd). Los valores de ambos índices tienen un rango que va entre -1 (todos los pares no concuerdan, no hay asociación) a 1 (todos los pares concuerdan, asociación perfecta).

9.2 RESULTADOS

En las tablas 2 y 3 se presentan las correlaciones (r_k : coeficiente de Kendall Tau-b) entre los niveles de incidencia de la monilia (binaria y ordinal) y las variables meteorológicas y Susc de los clones e interacciones entre ambas, para los sitios La Cabaña y Chimita respectivamente.

Tabla 2. Coeficientes de correlación (Kendall Tau-b) de variables meteorológicas y Susc ligada a la susceptibilidad de los clones e interacciones entre ambas, en relación a los niveles mensuales de incidencia de la monilia ordinales (S, M, L) y binarios (S, L). **Sitio: La Cabaña**

Coeficientes de correlación (r_k : Kendall Tau-b)		
Variables e Interacciones^a	Respuesta Ordinal	Respuesta Binaria
DPrec	-0,02	0,04
DPrec12	-0,14	-0,10
DPrec1	0,07	0,13
PPrec1	0,14	0,19
PrecAc	-0,09	-0,03
Susc	0,31	0,30
It1=Susc*DPrec12	0,10	0,10
It2=Susc*PPrec1	0,28	0,27
It3=Susc*DPrec1	0,27	0,26

a DPREC: cantidad de días con registros de Prec>0,2 mm; DPREC12: cantidad de días con registro de Prec>12 mm.; DPREC1: cantidad de días con registros de Prec>1 mm; PPREC1: número de períodos de dos días consecutivos con registro de Prec>1mm en ambos días; PrecAc: precipitaciones diarias acumuladas (mm); Susc: toma valores de 0 y 1, de acuerdo a la susceptibilidad del clon a la monilia. Período crítico susceptible (PCS): las variables regresoras se calcularon en lapsos de 40 días previos a cada valor de fin de cada mes de Inc%. PCS se inicia a los 80 días previos a cada fecha (fin de mes) de observación de Inc% y finaliza 40 días previos respecto a cada fecha de fin de mes. El clon CCN-51 se codificó como Susc= 0 (resistente), mientras que el clon FLE-2 se codificó como Susc=1 (susceptible).

Las correlaciones de Kendall (r_k) entre las variables meteorológicas y los niveles de enfermedad (binarios y ordinales) fueron bajas. En La Cabaña (Tabla 2), dentro de un panorama de bajos valores de r_k , se destacó la correlación presentada por la variable PPREC1 (r_k = 0,14 y 0,19, para respuesta ordinal y binaria). Valores más altos de (PPREC1) se asociarían al requerimiento de mojado del fruto, necesario para el proceso de infección fúngica.

Tabla 3. Coeficientes de correlación (Kendall Tau-b) de variables meteorológicas y Susc ligada a la susceptibilidad de los clones e interacciones entre ambas, en relación a los niveles mensuales de incidencia de la monilia ordinales (S, M, L) y binarios (S, L). **Sitio: Chimita**

Coeficientes de correlación (r_K : Kendall Tau-b)		
Variable Meteorológica^a	Respuesta Ordinal	Respuesta Binaria
DPrec	-0,06	0,07
DPrec8	0,21	0,25
DPrec1	0,00	0,16
PPrec8	0,34	0,29
PrecAc	0,06	0,17
Susc	0,28	0,23
It1= Susc*DPrec8	0,30	0,30
It2= Susc*PPrec8	0,29	0,23
It3= Susc*DPrec1	0,25	0,25

a DPREC: cantidad de días con registros de Prec>0,2 mm; DPREC8: cantidad de días con registro de Prec>8 mm.; DPREC1: cantidad de días con registros de Prec>1 mm; PPREC8: número de períodos de dos días consecutivos con registro de Prec>8mm en ambos días; PrecAc: precipitaciones diarias acumuladas (mm); Susc: toma valores de 0 y 1, de acuerdo a la susceptibilidad del clon a la monilia. Período crítico susceptible (PCS): las variables regresoras se calcularon en lapsos de 40 días previos a cada valor de fin de cada mes de Inc%. PCS se inicia a los 80 días previos a cada fecha (fin de mes) de observación de Inc% y finaliza 40 días previos respecto a cada fecha de fin de mes.

En Chimita (Tabla 3), la variable PPREC8 observó el valor más alto de correlación de Kendall (r_K) con la incidencia de monilia, contrastando con la correlación negativa que presentó la variable DPREC12 en La Cabaña. Esta correlación negativa presentada por DPREC12 podría estar asociada al efecto de lavado de esporas en respuesta a la ocurrencia de precipitaciones diarias abundantes (precipitaciones diarias mayores a 12 mm). En La Cabaña y Chimita, la variable discreta, que cuantifica el efecto de la susceptibilidad de los clones (susceptible y resistente) a la monilia, alcanzó valores bajos y positivos de correlación con la incidencia de la enfermedad, que oscilaron entre 0,23 y 0,31 (considerando ambos sitios y ambas respuestas: ordinal y binaria).

Desarrollo de modelos de regresión logística

Sitio: La Cabaña

El modelo logístico I de respuesta ordinal que incluye a las variables meteorológicas PPrec1 y PrecAc y la variable Susc, fijando niveles de significancia para entrar (NSE) y permanecer (NSP) en el modelo menores a 0,05 se presenta en la tabla 4. El test de *chi-cuadrado* para verificar el supuesto de líneas paralelas fue significativo ($\chi^2=1,5008$ con tres grados de libertad, $P > \chi^2=0,6821$). El Modelo I logró una precisión de predicción de 60,7%, clasificando correctamente el nivel de infección en 51 de las 84 observaciones de Inc% de monilia.

Tabla 4. Estimadores de los parámetros del modelo de regresión logística ajustado para estimar la probabilidad de ocurrencia de cada categoría **ordinal** de Inc% de monilia (severo S, moderado M y ligero L), basado en variables meteorológicas y Susc de los clones de cacao a la monilia. Sitio La Cabaña

Modelo ^a	Ecuaciones del Modelo ^b	Precisión de predicción (%)
I	$\text{LogitPrS} = -1,746 + 0,5539 \cdot \text{PPrec1} - 0,0212 \cdot \text{PrecAc} + 1,4823 \cdot \text{Susc}$ $\text{LogitPrMac} = -0,2153 + 0,5539 \cdot \text{PPrec1} - 0,0212 \cdot \text{PrecAc} + 1,4823 \cdot \text{Susc}$	60,7

^a Modelo I: concordante(%)=78,9; discordante(%)=20,9; empate(%)=0,3; Somers'D=0,58; Gamma=0,58. $\text{LogitPrS} = \ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})$; $\text{LogitPrMac} = \ln(\text{PrMac}/1-\text{PrMac})$. Resolviendo las expresiones $\text{Exp}(\text{LogitPrS})/(1+\text{Exp}(\text{LogitPrS}))$ y $\text{Exp}(\text{LogitPrMac})/(1+\text{Exp}(\text{LogitPrMac}))$ se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel de Inc% severo (S)) y PrMac (probabilidad acumulada de ocurrencia de un nivel de Inc% => a la categoría moderada (M)). "ln" es el logaritmo natural. $\text{PrM} = \text{PrMac} - \text{PrS}$. $\text{PrL} = 1 - (\text{PrS} + \text{PrM})$ Siendo, PrL la probabilidad de observar un nivel de Inc% de monilia ligero (L).

^bPPrec1: número de períodos de dos días consecutivos con registro de Prec>1mm en ambos días; PrecAc: precipitaciones diarias acumuladas (mm); Susc: toma valores de 0 y 1, de acuerdo a la susceptibilidad del clon a la monilia. El clon CCN-51 se codificó como Susc= 0 (resistente), mientras que el clon FLE-2 se codificó como Susc=1 (susceptible)

El modelo II de respuesta binaria con (NSE y NSP < a 0,01) incluyó las mismas variables que el modelo I. En este caso la habilidad predictiva del modelo es mayor, clasificando incorrectamente sólo 13 de los 84 niveles de enfermedad observados (precisión de predicción: 84,5%). También se incrementaron otros índices de habilidad predictiva como Somers'D y Gamma (0,77) y concordancia (88,5%) (Tabla 5).

Tabla 5. Estimadores de los parámetros del modelo II, basado en variables meteorológicas y Susc de los clones de cacao. Sitio: La Cabaña

Modelo^a	Ecuación del Modelo^b	Precisión de predicción (%)
II	$\text{LogitPrS} = -2,2962 + 0,7377 * \text{PPrec1} - 0,0273 * \text{PrecAc} + 2,1534 * \text{Susc}$	84,5

^a Modelo II: concordante(%)= 88,5; discordante (%)=11,5; empate (%)= 0,0; Somers'D=0,77; Gamma=0,77. $\text{LogitPrS} = \ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})$. Resolviendo la expresión: $\text{Exp}(\text{LogitPrS})/(1+\text{Exp}(\text{LogitPrS}))$ se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel de incidencia de monilia (Inc%) severo (S). $\text{PrL} = 1 - \text{PrS}$, siendo PrL la probabilidad de observar un nivel de Inc% moderado a ligero (L). ^bPPrec1: número de períodos de dos días consecutivos con registro de Prec>1mm en ambos días; PrecAc: precipitaciones diarias acumuladas (mm); Susc: toma valores de 0 y 1, de acuerdo a la susceptibilidad del clon a la monilia. El clon CCN-51 se codificó como Susc= 0 (resistente), mientras que el clon FLE-2 se codificó como Susc=1 (susceptible)

Sitio: Chimita

En la Tabla 6 se presenta el modelo logístico III de respuesta ordinal que incluye a las variables DPrec y DPrec8 y a la interacción entre Susc y DPrec8 (It1). Este se corrió, fijando niveles de significancia para entrar (NSE) y permanecer (NSP) menores a 0,10. El test de chi-cuadrado para verificar el supuesto de líneas paralelas indicó que el modelo fue apropiado para los datos analizados (chi-cuadrado=0,5177 con tres grados de libertad, $\text{Pr} > \text{chi-cuadrado} = 0,915$ y logró una precisión de predicción de 63,6%, clasificando correctamente 42 de las 66 observaciones de Inc% de monilia expresada en niveles ordinales (Tabla 6).

Tabla 6. Estimadores de los parámetros del modelo III, basado en variables meteorológicas y Susc de los clones de cacao e interacciones. Sitio Chimita

Modelo^a	Ecuaciones del Modelo^b	Precisión de predicción (%)
III	$\text{LogitPrS} = -1,5518 + 0,4976 \cdot \text{DPrec8} - 0,1869 \cdot \text{DPrec} + 0,3162 \cdot \text{It1}$ $\text{LogitPrMac} = 1,6479 + 0,4976 \cdot \text{DPrec8} - 0,1869 \cdot \text{DPrec} + 0,3162 \cdot \text{It1}$	63,6

^a Modelo III: concordante (%)=75,6; discordante (%)=23,5; empate (%)=0,9; Somers'D=0,52; Gamma=0,53. $\text{LogitPrS} = \ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})$; $\text{LogitPrMac} = \ln(\text{PrMac}/1-\text{PrMac})$. Resolviendo las expresiones $\text{Exp}(\text{LogitPrS}) / (1 + \text{Exp}(\text{LogitPrS}))$ y $\text{Exp}(\text{LogitPrMac}) / (1 + \text{Exp}(\text{LogitPrMac}))$ se obtienen los valores de: PrS (probabilidad de observar un nivel de Inc% severo (S)) y PrMac (probabilidad acumulada de ocurrencia de un nivel de Inc% => a la categoría moderada (M)). “ln” es el logaritmo natural. $\text{PrM} = \text{PrMac} - \text{PrS}$. $\text{PrL} = 1 - (\text{PrS} + \text{PrM})$ siendo “PrL” la probabilidad de observar un nivel de Inc% de monilia ligero (L).

^bDPrec: cantidad de días con registros de Prec>0,2 mm; DPrec8: cantidad de días con registro de Prec>8 mm.; Susc: toma valores de 0 y 1, de acuerdo a la susceptibilidad del clon a la monilia. El clon CCN-51 se codificó como Susc= 0 (resistente), mientras que el clon FLE-2 se codificó como Susc=1 (susceptible) Interacciones entre dos variables (producto): $\text{It1} = \text{Susc} \cdot \text{DPrec8}$.

El modelo IV de respuesta binaria (niveles de (NSE) y (NSP) menores a 0,10) incluyó a la variable PPrec8 y a la interacción entre Susc y DPrec8 (Tabla 7). El modelo clasificó correctamente 51 de las 66 observaciones de la enfermedad (precisión de predicción: 77,3%).

Tabla 7. Estimadores de los parámetros de modelos IV, basado en variables meteorológicas y Susc de los clones de cacao e interacciones. Sitio: Chimita

Modelo^a	Ecuación del Modelo^b	Precisión de predicción (%)
IV	$\text{LogitPrS} = -1,778 + 0,571 \cdot \text{PPrec8} + 0,2664 \cdot \text{It1}$	77,3

^a Modelo IV: concordante (%)= 72,5; discordante (%)18,8; empate (%)= 8,7; Somers'D=0,56; Gamma=0,59. $\text{LogitPrS} = \ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})$. Resolviendo la expresión: $\text{Exp}(\text{LogitPrS}) / (1 + \text{Exp}(\text{LogitPrS}))$ se obtienen los valores de: PrS (probabilidad de observar un nivel de incidencia de monilia (Inc%) severo (S)) y $\text{PrM-L} = 1 - \text{PrS}$, siendo PrM-L la probabilidad de observar un nivel de Inc% moderado a ligero (M-L).

^b PPrec8: número de periodos de dos días consecutivos con registro de Prec>8mm en ambos días. DPrec8: cantidad de días con registro de Prec>8 mm. $\text{It1} = \text{Susc} \cdot \text{DPrec8}$. Susc toma valores de 0 y 1, de acuerdo a la susceptibilidad del clon a la monilia. El clon CCN-51 se codificó como Susc= 0 (resistente), mientras que el clon FLE-2 se codificó como Susc=1 (susceptible)

9.3 DISCUSION

En los últimos años, la técnica de regresión logística de respuesta binaria y ordinal ha sido frecuentemente usada para desarrollar modelos predictivos de niveles de ocurrencia de enfermedades fúngicas y micotoxinas asociadas (Johnson *et al.*, 1996; Turechek y Stevenson, 1998; De Wolf *et al.*, 2003; Mila *et al.*, 2004; Paul y Munkold, 2004; Moschini *et al.*, 2006; Henderson *et al.*, 2007; Harikrishnan y Del Río, 2008; Martínez *et al.*, 2010; Carmona *et al.*, 2010; Moschini *et al.*, 2014a; Sancho *et al.*, 2018). En la presente tesis, la misma técnica estadística fue utilizada para ajustar modelos de predicción de niveles de monilia en cacao, en base a variables meteorológicas calculadas a partir de datos de precipitación diaria y a una variable discreta que indica la susceptibilidad de dos clones respecto a la enfermedad.

Las mazorcas del árbol de cacao son los únicos órganos susceptibles a la monilia (Suárez, 1971; Desrosiers y Suarez, 1974). El periodo de incubación dura entre 3 a 8 semanas, dependiendo de la edad de la mazorca, susceptibilidad del clon y condiciones ambientales, principalmente precipitación y humedad relativa. En este estudio, las variables meteorológicas se calcularon en el período crítico susceptible de 40 días, coincidiendo con lo señalado por Suarez (1971) y Leandro (2011). Estos autores establecieron que el proceso de infección empieza cuando los conidios de *M. royeri* llegan a la superficie de las mazorcas de cacao, donde germinan y penetran a la mazorca, causando daños internos en las primeras etapas de la enfermedad (asintomática en las primeras etapas de la infección). Síntomas externos como pequeñas partes oscuras en la superficie de las mazorcas pueden ser observadas después de 40 a 80 días de infección, coincidiendo con el posicionamiento temporal del período crítico susceptible definido en esta tesis.

Las variables meteorológicas analizadas en este trabajo se calcularon a partir de datos diarios de precipitación. La precipitación es muy importante para el desarrollo epidémico de la monilia, interviniendo en la dispersión de los conidios y como fuente de mojado, fundamental para el proceso de infección. Las épocas con frecuentes e intensas precipitaciones, características de los climas tropicales, se relacionan con períodos de alta incidencia de la enfermedad. Contrariamente, Castro (1989) señaló que las lluvias torrenciales pueden generar efectos negativos sobre el desarrollo de la enfermedad (lavado de esporas), dándole sentido biológico a las correlaciones negativas de las variables PrecAc

(precipitaciones diarias acumuladas) y DPrec12 (cantidad de días con precipitaciones mayores a 12 mm) con los niveles de incidencia de monilia en La Cabaña.

En La Cabaña, el modelo de regresión de respuesta binaria que incluyó a las variables PPrec1 (número de períodos de dos días consecutivos con registro de Prec>1mm en ambos días), PrecAc (pendiente negativa) y Susc (0 o 1 de acuerdo a la susceptibilidad de los clones), fue el que presentó los más altos índice de habilidad predictiva, como el caso de la precisión de predicción que alcanzó valores de 84,5%. La variable PPrec1 satisfaría el requerimiento de mojado de larga duración del tejido vegetal para el proceso de infección de un hongo necrotrófico, como *M. royeri*. También puede derivarse que mayor frecuencia de períodos de dos días con lluvias estaría acompañada de altos registros de humedad relativa del aire en dichos lapsos. La pendiente negativa observada para la variable PrecAc resulta coherente con el hecho de presentar correlaciones negativas con la incidencia de monilia. En Chimita, el modelo de regresión logística de respuesta binaria alcanzó una precisión de predicción de 77,3%, superior a la del modelo de respuesta ordinal (63,6%). El modelo binario seleccionado incluyó a la variable meteorológica PPrec8 (períodos de dos días con precipitación >8mm en ambos días) y a la interacción (producto) entre la variable discreta Susc y DPrec8. Las variables meteorológicas PPrec8 y DPrec8, satisfarían el requerimiento para la dispersión de conidios y película de agua necesaria para la infección. En ambos sitios, los modelos logísticos de respuesta ordinal y binaria han incorporado a la variable Susc, que diferencia un clon resistente de uno susceptible (Susc=1) al patógeno.

Alcance de la tesis

Los modelos predictivos de una enfermedad de cultivo, diseñados para uso operativo y aplicación en el MIE, deben ser simples, económicos, basados en datos biológicos y climáticos confiables y completos y desarrollados sobre una enfermedad de ocurrencia esporádica y para la cual se dispongan de métodos efectivos de manejo y fungicidas eficientes. Otros modelos de tipo mecanístico son más complejos, computacionalmente costosos y analizan variables de difícil medición. Estos modelos, usados en investigación, deben ser realistas en el sentido que reflejen apropiadamente la relación huésped-patógeno.

De acuerdo a Moore-Landecker (1996), la temperatura es un elemento meteorológico crucial para la expresión de enfermedades fúngicas. La temperatura tiene influencia en la tasa de crecimiento de los hongos, provocando el aumento de la actividad enzimática y química.

Sin embargo, una temperatura excesiva puede inactivar dichas actividades y detener el crecimiento. Esta relevancia del factor térmico magnifica el impacto de la carencia de registros de temperatura máxima y mínima completos. El alcance de los resultados de esta tesis se limitó no sólo por esta falta de registros térmicos sino también por la inexistencia de registros diarios completos de humedad relativa. Sólo se contó con datos de precipitación diaria para calcular las variables meteorológicas regresoras analizadas.

Las observaciones mensuales de incidencia de *M. roreri*, disponible se unificaron en una fecha (fin de cada mes), no disponiendo de las fechas exactas de registros de la monilia a lo largo del mes. Ello impidió precisar el real período crítico susceptible, puesto que en todos los casos el período crítico se determinó respecto a la fecha de fin de cada mes (40 y 80 días previos a esa fecha). Otro aspecto limitante estuvo en la observación de la incidencia de *M. roreri* sobre un número cambiante de mazorcas totales cosechadas por clon, mes y sitio.

Los resultados de esta tesis pueden orientar futuras investigaciones, corrigiendo los factores que limitaron el alcance del trabajo presente. Es importante considerar una continuidad de este trabajo con más observaciones de campo, incluyendo más variables meteorológicas, como aporte a un sistema de manejo integrado de la monilia en el cultivo de cacao.

9.4 CONCLUSIONES

* Los efectos Año y Mes sobre la incidencia de *M. royeri* fueron significativos al 1% en los sitios (La Cabaña y Chimita, San Vicente de Chucuri, Santander, Colombia). Analizando los datos de incidencia del patógeno, el efecto Clon fue significativo al 1% en La Cabaña y al 10% en Chimita

*, el clon FLE-2 difirió significativamente del clon CCN-51 siendo este último más resistente que el primero en La Cabaña (alfa: 0.01) y Chimita (alfa=0.06). Esa diferencia en la respuesta de ambos clones, avaló su inclusión como variable discreta regresora en modelos logísticos (Susc=0, resistente; Susc=1, susceptible).

* Se detectó como limitación que el valor mensual de incidencia por clon sea calculado con un número muy variable de mazorcas cosechadas, afectando la comparación entre los valores de incidencia de la monilia.

* Síntomas externos, como pequeñas partes oscuras en la superficie de las mazorcas, pueden ser vistos después de 40 a 80 días de la infección, coincidiendo con el posicionamiento temporal del período crítico susceptible (PCS) Las variables meteorológicas regresoras calculadas en este PCS de 40 días de longitud, alcanzaron las más fuertes correlaciones con los niveles de enfermedad.

* Las correlaciones de Kendall (r_k) entre las variables meteorológicas (asociadas a la ocurrencia de precipitación) y los niveles de enfermedad (binarios y ordinales) fueron bajas. En La Cabaña se destacó la correlación presentada por la variable PPrec1 ($r_k = 0,14$ y $0,19$, para respuesta ordinal y binaria). Valores más altos de esta variable (PPrec1: número de períodos de dos días consecutivos con precipitaciones $>1\text{mm}$ en ambos días) satisfacerían el requerimiento de mojado del fruto, necesario para el proceso de infección fúngica. En Chimita valores r_k de $0,34$ y $0,29$, para respuesta ordinal y binaria, se observaron para la variable PPrec8 (períodos de dos días con precipitación $>8\text{mm}$ en ambos días). En La Cabaña y Chimita, la variable discreta, que cuantifica el efecto de la susceptibilidad de los clones

(susceptible y resistente) a la monilia, alcanzó valores moderados y positivos de correlación con la incidencia de la enfermedad, que oscilaron entre 0,23 y 0.31 (considerando ambos sitios y ambas respuestas: ordinal y binaria).

* Utilizando la técnica de regresión logística se pudieron desarrollar modelos preliminares para predecir las probabilidades de ocurrencia de niveles (binarios y ordinales) de incidencia de monilia, en base a variables genético-ambientales en ambos sitios, “Chimita” y “La Cabaña”

* Los mayores índices de habilidad predictiva fueron alcanzados por los modelos de regresión logística de respuesta binaria (84,5% y 77,3%: para La Cabaña y Chimita respectivamente).

* En La Cabaña, el modelo de regresión de respuesta binaria más preciso incluyó a las variables PPrec1, PrecAc (precipitación acumulada, pendiente negativa) y Susc. Este modelo presentó los más altos índices de habilidad predictiva (precisión de predicción=84,5%).

* En Chimita, el más preciso modelo binario incluyó a la variable PPrec8 y a la interacción entre (Susc) y DPrec8. Estas variables satisfarían el requerimiento del hongo por el registro de lluvias con energía suficiente para la dispersión de conidios y proveen la película de agua, necesario para la infección

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aime, M. C., Phillips-Mora, W. (2005). The causal agents of witches' broom and frosty pod rot cacao (chocolate, *Theobroma cacao*) form a new lineage of Marasmiaceae. *Mycologia*, 97 (5), 1012-1022.
- Albuquerque, P. S., Bastos, C. N., Luz, E. D., Silva, S. D. (2005). Doenças do cacauero (*Theobroma cacao*). En H. Kimati, L. Amorim, J. A. Rezende, A. Bergamin Filho, y L. E. Camargo, Manual de fitopatología (Tercera ed., págs. 151 - 163). Sao Paulo. Editora Agronômica CERES Ltda.
- Amores, F., Agama, J., Suárez, C., Quiroz, J., Motato, N. (2009). EET 575 y EET 576 nuevos clones de cacao nacional para la zona central de Manabí. Quevedo: Estación Experimental Tropical "Pichilingue". Boletín Divulgativo no. 346. 31 p.
- Ampuero, C. E. (1967). Monilia pod rot of cocoa. *Cocoa grower's bulletin*, 9, 15-18.
- Aránzazu, H. F., G. N. Martínez & D. Martínez. 2009. Estado actual de las investigaciones sobre la moniliasis del cacao en Colombia *Moniliophthora roreri* (Cif. Evans *et al.*). Congreso Internacional de cacao: Investigación, transferencia de tecnología y comercialización, presente y futuro. 20-22 de octubre de 2009. Bucaramanga, Colombia.
- Arguello, O. (1997). Evaluación de materiales de cacao por resistencia a *Moniliophthora roreri* en Santander. Tercer Seminario Técnico de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (págs. 23-28.). Bucaramanga: Corpoica.
- Ariefdjohan, M. W., Savaiano, D. A. (2005). Chocolate and cardiovascular health: is it too good to be true? *Nutrition Reviews*, 63 (12), 427-430.
- Asociación Nacional de Exportadores de Cacao- Ecuador. (2015). Historia del cacao. Recuperado el 25 de Noviembre de 2016, de Anecacao: <http://www.anecacao.com/index.php/es/quienes-somos/historia-del-cacao.html>
- Bailey, B. A., Meinhardt, L. W. (2016). Cacao diseases: a history of old enemies and new encounters. Beltsville: Springer International Publishing. 633 p.

- Barros, O. (1982). Historia de la monilia y sus repercusiones en los países productores de cacao en Sur América. En G. A. Enríquez, La moniliasis del cacao. Serie técnica. Informe Técnico N° 28 (págs. 14-17). Turrialba: CATIE.
- Bartley, B. G. (2005). The genetic diversity of cacao and its utilization (Primera ed.). CABI Publishing. 368 p.
- Bayer, C., Kubitzki, K. (2003). Malvaceae. En K. Kubitzki, C. Bayer, Flowering Plants · Dicotyledons (págs. 225-311). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bowers, J. H., Bailey, B. A., Hebbar, P. K., Sanogo, S., Lumsden, R. D. 2001. The impact of plant diseases on world chocolate production. *Plant Health Progress*, 14. Recuperado el 25 de Octubre de 2017 de The American Phytopathological Society: <http://www.apsnet.org/publications/apsnetfeatures/pages/worldchocolateproduction.aspx>.
- Campbell, C.L. y Madden, L.V. (1990). Introduction to plant disease epidemiology. Wiley, New York. 532p.
- Campuzano, H. (1981). Influencia de la temperatura y la humedad en la germinación de esporas de *Monilia roreri*. En: 8th International Cocoa Research Conference. Colombia (493-497). Lagos, Nigeria: Acts Cocoa Producers' Alliance.
- Campuzano, H. (1980). La moniliasis del cacao. *El Cacaotero Colombiano*, 13, 21-24.
- Cárdenas, C. E., Giraldo, J. D. (1986). Evaluación de la respuesta de algunos cultivares del cacao (*Theobroma cacao*) a *Moniliophthora roreri* mediante dos métodos de inoculación en frutos y semillas germinadas. Tesis de Grado, (págs 13-23) Universidad de Caldas, Caldas. 107 p.
- Carmona, M., Moschini, R., Cazenave, G., Sautua, F. (2010). Relación entre la precipitación registrada en estados reproductivos de la soja y la severidad de *Septoria glycines* y *Cercospora kikuchii*. *Tropical Plant Pathology*, 35 (2), 71-78.
- Castaño, J. (1952). Monilia del cacao en una región del departamento de Caldas. *Agricultura Tropical*, 8 (6), 21-25.

- Castro, O. E. (1989). Dinámica de la población de conidios e incidencia de monilia a diferentes alturas a partir del suelo de un cacaotal de Matina, Limón. Tesis de Grado, Universidad de Costa Rica, San José. 65 p.
- Cheesman, E. E. (1944). Notes on the nomenclature, classification and possible relationships of cocoa populations. *Tropical Agriculture*, 4, 144-159.
- Ciferri, R., Parodi, E. (1933). Descrizione del fungo che causa la 'Moniliasi' del cacao. *Phytopathologische Zeitschrift*, 6, 539-42.
- Coakley, S. M. (1988). Variation in climate and prediction of disease in plants. *Ann. Rev. Phytopathol*, 26, 163-81.
- Correa, J., Castro, S., Coy, J. (2014). Estado de la moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* en Colombia. *Acta Agronómica*, 63 (4), 388 - 399.
- Cote, F. M., Jiménez, B. J. (2005). Caracterización de clones de cacao promisorios con énfasis en el contenido de micronutrientes. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 84 p.
- Cuatrecasas, J. (1964). Cacao and its allies; a taxonomic revision of the genus *Theobroma*. *Contributions from the United States National Herbarium*, 35, 379-614.
- Cubillos, G., Merizalde, G. J., Correa, E. (2008). Manual de beneficio del cacao. Medellín: Gobernación de Antioquia, Corporación para Investigaciones Biológicas, Compañía Nacional de Chocolates, Universidad de Antioquia. 29 p.
- Cueto, M. J., Aguiere, M. F., Zamarrita, C. A., Iracheta, D. L., Oliveira de los Santos, A. (2007). El mejoramiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) en México. Chiapas. Número 4 de Libro técnico / Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Pacífico Sur, Campo Experimental Rosario Izapa. 167 p.
- DANE. (2016). 3er censo nacional agropecuario 2013. Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017 de DANE: <http://www.dane.gov.co/index.php/51-espanol/noticias/2895-tercer-censo-nacional-agropecuario>.

- Davila, H. A. (2014). Estimación de la cantidad de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en los departamentos de Suchitepquez y Retalhuleu del sur-occidente de Guatemala. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 133 p.
- De Almeida, A., Valle, R. (2008). Ecophysiology of the Cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19, 425-448.
- De Wolf, E. D., Madden, L. V., Lipps, P. E. (2003). Risk assessment models for *Fusarium* Head Blight epidemics based on within-season weather data. *Phytopathology*, 93 (4), 428–435.
- Del Ponte, E. M., Godoy, C. V., Li, X., Yang, X. B. (2006). Predicting severity of Asian soybean epidemics with empirical rainfall models. *Phytopathology*, 96, 797-803.
- Desrosiers, R., Suarez, C. (1974). Monilia pod rot of cacao. En P. H. Gregory, Phytophthora disease of cocoa (págs. 273-277). Londres: London Longman Group.
- Ding, E. L., Hutfless, S. M., Ding, X., Girotra, S. (2006). Chocolate and Prevention of Cardiovascular Disease: A Systematic Review. *Nutrition Metabolism*, 3 (2), 1 – 12.
- Ecosystems Research and Development Sureau. (2015). Cacao (*Theobroma cacao* Linnaeus). *Research Information Series on Ecosystem*, 27 (1), 1-13.
- Enríquez, G. A. (1992). La cura o beneficio del cacao. Curso corto. Nicaragua, 16 – 18 de noviembre de 1982. CATIE, Departamento de Producción Vegetal. Turrialba, Costa Rica. 96 p.
- Enríquez, G. A. (2004). Cacao orgánico: Guía para productores ecuatorianos. Quito: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias.
- Espinal, C. F., Martínez, H. J., Ortíz, L. (2005). La cadena del cacao en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Documento de trabajo No. 58. Bogotá. Uri: <http://hdl.handle.net/11348/5890>
- Evans, H. C. (1981). Pod rot of Cacao caused by *Moniliophthora* (Monilia) *roreri*. Londres: Commonwealth Mycological Institute. Kew, Surrey: Commonwealth Mycological Institute, c1981. Phytopathological paper, 24, 44.

- Evans, H. C. (1986). A reassessment of *Moniliophthora* (Monilia) pod rot of cacao. *Cocoa Growers' Bulletin* N° 37, 34-43.
- Evans, H. C. (2007). Cacao diseases-The trilogy revisited. *Phytopathology*, 97 (12), 1640-1643.
- Evans, H. C., Holmes, K. A., Phillips, W., Wilkinson, J. M. (2002). What's in a name: *Crinipellis*, the final resting place for the frosty pod rot pathogen of cocoa? *Mycologist*, 16 (4), 148-152.
- Evans, H. C., Holmes, K. A., Reid, A. P. (2003). Phylogeny of the frosty pod rot pathogen of cocoa. *Plant Pathology*. 52 (4), 476–485.
- Evans, H. C., Stalpers, J. A., Samson, R. A., Benny, G. L. (1978). On the taxonomy of *Monilia roreri*, an important pathogen of *Theobroma cacao* in South America. *Canadian Journal of Botany*, 56 (20), 2528-2532.
- Fallas, A. (1983). Estudio sobre la epifitología de la moniliasis del cacao (*Moniliophthora roreri* Cif & Par) Evans en dos zonas productoras de Costa Rica. Tesis Bachelor. San Carlos, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 78 p.
- FAO. (2015). Faostat. (F. a. Nations, Ed.) Recuperado el 19 de Octubre de 2016, de Statistics Division: <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S>.
- FHIA (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola). (2003). Identificación y control de la moniliasis del cacao. Recuperado el 27 de Octubre de 2016, de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A3979e/A3979e.pdf>
- Fondo Nacional del Cacao. (2011). Campaña contra la Moniliasis del cacao. Boletín informativo. 22p.
- García, O., Macedo, J. A., Tibúrcio, R., Zaparoli, G., Rincones, J., Bittencourt, L. M., Ceita, G. O., Micheli, F., Gesteira, A.; Mariano, A. C., Schiavinato, M. A., Medrano, F. J., Meinhardt, L. W., Pereira, G. A., Cascardo, J. C M. (2007). Characterization of necrosis and ethylene-inducing proteins (NEP) in the basidiomycete *Moniliophthora perniciosa*, the causal agent of witches' broom in *Theobroma cacao*. *Mycological Research*, 111 (4), 443-455.

- Girón, J., García, R. V., Vázquez, M., Ceballos, G. M., Méndez, E. (2012). “Xocolatl: antes alimento de los dioses, y ahora...”. *La Ciencia y el Hombre, Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana*, 25 (3), 33-38.
- Hardy, F. (1961). *Manual de Cacao*. Edición en español. Edit. Turrialba: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Costa Rica. 439p.
- Harikrishnan, R., Del Río, L. E. (2008). A logistic regression model for predicting risk of White mold incidence on dry bean in North Dakota. *Plant Disease*, 92 (1), 42-46.
- Hebbar, P. K. (2007). Cacao Diseases: A Global Perspective from an Industry Point of View. *Phytopathology*, 97 (12), 1658-1663.
- Henderson, D., Williams, C. J., Miller, J. S. (2007). Forecasting late blight in potato crops of southern Idaho using logistic regression analysis. *Plant Disease*, 91 (8), 951-956.
- Herrera, F. (1988). Efecto de factores nutricionales y físicos sobre el crecimiento y esporulación de *Moniliophthora roreri* in vitro. Tesis Magister Science. Turrialba, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 159 p.
- Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied logistic regression* (2nd ed.). New York, NY: John Wiley and Sons. doi:10.1002/0471722146
- Hyre, R. A. (1954). Progress in forecasting late blight of potato and tomato. *Plant Disease Reporter*, 38, 245-253.
- ICCO (International Cocoa Organization). (2013). Origins Of Cocoa And Its Spread Around The World. Recuperado el 12 de Marzo de 2016, de Growing Cocoa: <https://www.icco.org/about-cocoa/growing-cocoa.html>
- ICCO. (2016a). ICCO Statement on Reports of a Cocoa Supply Deficit in 2020. Recuperado el 12 de Marzo de 2016, de Growing Cocoa: <https://www.icco.org/about-us/icco-news/270-icco-statement-on-reports-of-a-cocoa-supply-deficit-in-2020.html>
- ICCO. (2016b). Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics. Obtenido de Vol. XLII, No. 3, Cocoa year 2015/16. Recuperado el 12 de Marzo de 2016, de Growing Cocoa: https://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat_view/30-related-documents/46-statistics-production.html

INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias). (1993). Manual del cultivo de cacao (Segunda ed.). Quevedo: Estación Experimental Tropical Pichilingue. Manual N° 25.

Jaimes, S. Aránzazu, F. (2010). Manejo de las enfermedades del cacao (*Theobroma cacao* L.) en Colombia, con énfasis en monilia (*Moniliophthora roreri*). Colombia: Corpoica. 90 p.

Jiménez, J. M. (1986). Combate biológico de la moniliasis del cacao (*Theobroma cacao*) causada por el hongo *Moniliophthora roreri*, mediante bacterias epífitas en la Zona Atlántica de Costa Rica. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Departamento de Producción Animal.

Johnson, D. A., Alldredge, J. R., Vakoch, D. L. (1996). Potato late blight forecasting models for the semiarid environment of south-central Washington. *Phytopathology*, 86 (5), 480-484.

Johnson, J., Bonilla, J., Agüero, L. (2008). Manual de manejo y producción del cacaotero. Leon, Nicaragua. 40 p.

Krause, R. A., Massie, L. B. (1975). Predictive systems: Modern approaches to disease control. *Annual Review of Phytopathology*, 13, 31-47.

Leandro, M. E. (2011). Efecto de los factores macro y microclimáticos y las características productivas del cacao sobre la epidemiología de la monilia. Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba. 87 p.

Llorente, I., Montesinos, E. (2004). Los modelos de predicción epidemiológica como herramienta en el control integrado de enfermedades. 15° Symposium internacional sobre evaluación del riesgo de plagas y enfermedades. El muestreo como herramienta en la protección integrada. Edición 164. Valencia. Recuperado el 15 de Agosto de 2017 de Phytohemeroteca: <https://www.phytoma.com/la-revista/phytohemeroteca/164-diciembre-2004/los-modelos-de-prediccion-epidemiologica-como-herramienta-en-el-control-integrado-de-enfermedades>.

Lloor, R. G., Risterucci, A. M., Courtois, B., Fouet, O., Jeanneau, M., Rosenquist, E., Amores, F., Vasco, A., Medina, M., Lanaud, C. (2009). Tracing the native ancestors of the modern *Theobroma cacao* L. population in Ecuador. *Tree Genetics y Genomes*, 5, 421–433.

- López, O., González, O., Lee, V., Alvarado, Á., Ramirez, S., Mendéz, J., Gehrke, M. (2006). Diagnóstico y técnicas para el manejo de la moniliasis del cacao. Universidad Autónoma de Chiapas; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Impreso: Digital. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 40 p.
- Lozada, B. S., Herrera, L. V., Perea, J. A., Stashenko, E., Escobar, P. (2012). Efecto in vitro de aceites esenciales de tres especies de *Lippia* sobre *Moniliophthora roreri* (Cif. y Par.) Evans et al., agente causante de la moniliasis del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agronómica*, 61 (2), 102-110.
- Malespín, M., Chavarría, D., Peralta, J. R., Enríquez, G. A., Martínez, R. (1982). El cacao. Managua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 61 p.
- Martínez, M., Moschini, R., Barreto, D., Bodega, J., Comerio, R., Forjan, H., Piatti, F., Presello, D., Valenttinuz, O. (2010). Factores ambientales que afectan el contenido de fumonisina en granos de maíz. *Tropical Plant Pathology*, 35 (5), 277-284.
- McLaughlin, H. (1950). Observation on cacao in Peru. *Cacao Information Bulletin*, 2 (6), 3-4.
- Meléndez, L. (1993). Microambiente, cantidad de esporas en el aire e incidencia del hongo *Moniliophthora roreri* (Cif y Par). Evans et al. bajo tres sistemas de manejo de sombra leguminosa en cacao (*Theobroma cacao* L.). Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica. CATIE, Turrialba. 81 p.
- Merchán, V. (1981). Avances de la investigación de la moniliasis del cacao en Colombia. *El cacaotero colombiano*, 16, 26 - 41.
- Mila, A. L., Carriquiry, A. L., Yang, X. B. (2004). . Logistic regression modeling of prevalence of soybean sclerotinia stem rot in the north-central region of the United Status. *Phytopathology*, 94 (1), 102-110.
- Mills, D. W. (1944). The efficient use of sulfur dust and sprays to control apple scab. *Cornell extension bulletin*, 630.
- Moore-Landecker, E. (1996). Fundamental of fungi (Cuarta ed.). Nueva Jersey: Benjamin Cummings. 574 p.

Moschini, R. C. (2018). Modelos predictivos de enfermedades como herramientas complementarias. (págs. 40-41). En: M. P. Giménez, M. E. Lago, M. Montoya, I. G. Laguna, E. Alberione, S. Distéfano. Talleres sobre Herramientas para la toma de decisiones en el manejo integrado de enfermedades de cereales y oleaginosas (Primera ed.). Ediciones INTA. Córdoba. 75 p

Moschini, R. C., Bombelli, E. C., Wright, E. R., López, M. V., Pérez Canone, H. I., Carmona, J. D., Varsallona, B., Barberis, J. G., Fabrizio, M. C., Rivera, M. C. (2014a). Ajuste de modelos logísticos a la tasa de incremento de severidad de manchas foliares ocasionadas por *Alternaria tenuissima* en arándano. *Horticultura Argentina*, 33, 27-35.

Moschini, R. C., Canteros, B. I., Martínez, M. I., De Ruyver, R. (2014b). Quantification of the environmental effect on citrus canker intensity at increasing distances from a natural windbreak in. *Australasian Plant Pathology*, 43 (6), 653-662.

Moschini, R. C., Sisterna, M. N., Carmona, M. A. (2006). Modelling of wheat black point incidence based on meteorological variables in the southern Argentinean Pampas region. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57 (11), 1151-1156.

Motamayor, J. C., Risterucci, A. M., Lopez, P. A., Ortiz, C. F., Moreno, A., Lanaud, C. (2002). Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, 89, 380-386.

Muller, A. (1941). El reconocimiento de las enfermedades de las plantas cultivadas en Venezuela 1937 - 1941. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales*, 7 (48), 99-113.

Navarro, M., Mendoza, I. (2006). Cultivo del cacao en sistemas agroforestales. Guía técnica para promotores. Río San Juan: ProDeSoc. 67 p.

NCBI (National Center for Biotechnology Information). (2016). Taxonomy. Recuperado el 12 de Marzo de 2016, de NCBI: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/taxonomy>.

Oliveira, M. L., Luz, E. D. (2005). Identificação e manejo das principais doenças do cacauero no Brasil. Ilhéus, CEPLAC/CEPEC/SEFIT. 132 p.

Orellana, R. G. (1956). La monilia y otras enfermedades del cacao en el este de Panamá. *Boletín Fitosanitario*. FAO, 4 (11), 168-169.

Oxford Business Group. (Sin fecha). Cacao production and exports on the rise. Recuperado el 12 de Febrero de 2017, de Oxford Business Group: <https://www.oxfordbusinessgroup.com/analysis/cacao-production-and-exports-rise>

Paul, P. A., Munkvold, G. P. (2004). A model-based approach to preplanting risk assessment for gray leaf spot of maize. *Phytopathology*, 94 (12), 1350-1357.

Phillips-Mora, W. (1986). Evaluación de la resistencia de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) a *Moniliophthora roreri* (Cif. y Par.) Evans et al. Costa Rica. Tesis de Maestría, CATIE, Turrialba. 100 p.

Phillips-Mora, W. (2003). Origin, biogeography, genetic diversity and taxonomic affinities of the cacao (*Theobroma cacao* L.) fungus *Moniliophthora roreri* (Cif.) Evans et al. as determined using molecular, phytopathological and morpho-physiological evidence. Tesis de Doctorado, The University of Reading, Londres. 349 p.

Phillips-Mora, W., Aime, M. C., Wilkinson, M. J. (2007). Bio-diversity and biogeography of the cacao (*Theobroma cacao*) pathogen *Moniliophthora roreri* in tropical America. *Plant Pathology*, 56, 911-922.

Phillips-Mora, W., Coutiño, A., Ortiz, C. F., López, A. P., Hernández, J., Aime, M. C. (2006). First report of *Moniliophthora roreri*, causing frosty pod rot (monilia disease) of cocoa in Mexico. *New Disease Reports*, 12, 41.

Phillips-Mora, W., Wilkinson, M. J. (2007). Frosty pod of cacao: A disease with a limited geographic range but unlimited potential of damage. *Phytopathology*, 97, 1644-1647.

Pinzón, U., Rojas, A. (2004). El beneficio y características físico-químicas del cacao. Federación Nacional de Cacaoteros Fondo Nacional del Cacao. Produmedios. Bogotá. 32 p.

Ploetz, R. (2007). Cacao diseases: Important threats to chocolate production worldwide. *Phytopathology*, 97 (12), 1634-1639.

Porras, V. H. (1982). Epifitiología de la moniliasis (*Monilia roreri* Cif y Par.) del cacao y su relación con la producción del árbol en la zona de Matina. Tesis de Grado, Universidad de Costa Rica, San José. 51 p.

- Pound, F. J. (1931). The genetic constitution of the cacao crop. *Annual Report on Cacao Research*, 2, 9 – 25.
- Ram, A. (1989). Biology, epidemiology and control of monilia (*Moniliophthora roreri*) of cacao. Tesis de Doctorado, Universidad de Londres, Londres. 286 p.
- Rodríguez, E., Medina, J. (2005). Caracterización de clones de cacao por respuesta a monilia, *Moniliophthora roreri* (Cif), en Santander. *Fitopatología Colombiana*, 28 (2), 61 – 64.
- Rojas, F., Sacristán, E. J. (2013). Guía ambiental para el cultivo del cacao (Segunda ed.). MinAgricultura (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural) y FEDECACAO (Federación Nacional de Cacaoteros). 127 p.
- Rorer, J. B. (1918). Enfermedades y plagas del cacao en el Ecuador y métodos modernos apropiados al cultivo de cacao. Asociación de Agricultores. Guayaquil. 80 p.
- Ruiz, D. (2016). *Moniliophthora roreri* (Ciferri) Moniliasis del Cacao. Recuperado el 12 de Octubre de 2016, de Instituto Nacional de Salud Agrícola Integral INSAI: <http://www.insai.gob.ve/wp-content/uploads/2016/09/Ficha-T%C3%A9cnica-Moniliasis-del-Cacao.pdf>
- Ruiz, J. A. (2014). Cacao y su aporte al desarrollo colombiano. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. 20 p. Recuperado el 2 de Octubre de 2016, de Universidad Militar: [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13292/ENSAYO%20Cacao%20y%20su%20aporte%20al%20desarrollo%20colombiano%20\(1\).pdf;jsessionid=0B5863D4DC41E913ECA51BA4A02E45E5?sequence=1](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13292/ENSAYO%20Cacao%20y%20su%20aporte%20al%20desarrollo%20colombiano%20(1).pdf;jsessionid=0B5863D4DC41E913ECA51BA4A02E45E5?sequence=1)
- Sánchez, F. D., Garcés, F. R. (2012). *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans *et al.* en el cultivo de cacao. *Scientia Agropecuaria*, 3, 249-258.
- Sancho A. M., Moschini, R. C., Filippini, S., Rojas, D., Ricca, A. (2018) Weather-based logistic models to estimate total fumonisin levels in maize kernels at export terminals in Argentina. *Tropical plant pathology*. 43, 99-108.
- Suárez, C. (1971). Estudio de mecanismos de penetración y del proceso de infección de *Monilia roreri* (Cif y Par) en frutos de cacao (*Theobroma cacao*). Tesis de Grado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil. 54 p.

- Suárez, C. (1980). El problema de la moniliasis y su combate en el Ecuador. En G. A. Enríquez, La moniliasis del cacao (págs. 70-87). Turrialba: CATIE.
- Tazelaar, C. J. (1991). Epidemiology of *Moniliophthora roreri*: A field study in the Atlantic Zone of Costa Rica. Turrialba: CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CR); MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 46 p.
- Thévenin, J. M., Trocmé, O. (1996). La moniliasis del cacao. *Plantations, recherche, développement*, 3 (6), 403-406.
- Torres de la Cruz, M. (2010). Progreso temporal y manejo integrado de la moniliasis (*Moniliophthora roreri* (Cif y Par.) Evans et al.) del cacao (*Theobroma cacao*) en Tabasco, México. Tesis de Doctorado, Colegio de postgraduados, Montecillo. 86 p.
- Tovar, H. (2000). El cacao en la sociedad colonial llegó a ser el primer producto agrario de exportación. *Revista Credencial Historia*, 130, 3 - 7.
- Toxopeus, H. (2001). Botany, types and populations. En G. A. Wood, R. A. Lass, Cocoa (Cuarta ed., págs. 11-37). Londres: Wiley-Blackwell.
- Turechek, W. W., Stevenson, K. L. (1998). Effects of host resistance, temperature, leaf wetness duration and leaf age on infection and lesion development of pecan scab. *Phytopathology*, 88 (12), 1294-1301.
- Vos, J., Ritchie, B. J., Flood, J. (2003). Discovery learning about cocoa. Petersfield: CABI Bioscience. 11 p.
- Wood, G. A. (1975). Cocoa (Tercera ed.). Nueva York. Lonman Group. 292 p.
- Wood, G. R., Lass, R. A. (1985). Cocoa (Cuarta ed.). Inglaterra. Longman, Essex. 620 p.
- Yang, J. Y., Scascitelli, M., Motilal, L. A., Sveinsson, S., Engels, J. M., Kane, N., Dempewolf, H., Zhang, D., Maharaj, K., Cronk, Q. C. B. (2013). Complex origin of Trinitario-type *Theobroma cacao* (Malvaceae) from Trinidad and Tobago revealed using plastid genomics. *Tree Genetics y Genomes*. 9 (3), 829–840
- Young, A. M. (1994). The chocolate tree. A natural history of cacao (Primera ed.). Washington: Smithsonian Institution Press. 200 p.

