CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO

Impacto del cambio climático en la productividad del café (*Coffea arabica*) bajo sistemas agroforestales en Costa Rica y Nicaragua

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de posgrado como requisito para optar el grado de *Magister Scientiae* en Agroforestería Tropical

Oriana Carolina Ovalle Rivera

Turrialba, Costa Rica

2015

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

***MAGISTER SCIENTIAE* EN AGROFORESTERÍA TROPICAL**

FIRMANTES:

Bruno Rapidel, Ph.D.
Codirector de tesis

Peter Läderach, Ph.D.
Codirector de tesis

Olivier Roupsard, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Elías de Melo Virgino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Francisco Jiménez, Dr. Sc.
Decano Programa de Posgrado

Oriana Carolina Ovalle Rivera
Candidata

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado especialmente a mi mamá Celia Rosa Rivera Peña quien siempre me apoya en todas las decisiones, es la persona que siempre me da fuerzas, me brinda cariño y sobre todo es una emprendedora en la vida.

A mi sobrina María José Rozo Ovalle que cada día tiene una luz especial y se convierte en una fuente de inspiración. A Mi hermana, Tatiana Melissa Ovalle Rivera, que es una luchadora y llena de una increíble energía.

A mi padre y hermano "los Luises", quienes son una parte importante en mi vida y los estimo demasiado. Por último, a toda mi familia, amigos y compañeros que siempre estuvieron pendientes de mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi codirector, Bruno Rapidel, por todo su apoyo incondicional durante el trabajo de investigación; por ayudarme a crecer profesionalmente y como persona. A Marcel Van Oijen por su paciencia, ayuda y orientación con el modelo CAF2007.

Al Comité asesor encabezado por Peter Läderach que me brindó la oportunidad de desarrollar este trabajo y apoyo en el proceso. Olivier Roupsard y Elias de Melo Virginio Filho que me facilitaron información levantada de los ensayos de sistemas agroforestales de café y apoyaron en el desarrollo de mi tesis.

Al proyecto CAFAdapt que me brindó la financiación para ejecutar el proyecto de tesis. A los caficultores, coordinadores de campo y técnicos que me apoyaron en el transcurso de este.

A Sebastián, Alejandra, Kauê, Edith y Marley que me hacían reír en los momentos difíciles y que estuvieron conmigo en todo el proceso.

CONTENIDO

DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTOS IV
LISTA DE FIGURAS VII
LISTA DE CUADROS VIII
RESUMEN IX
ABSTRACT X
CAPÍTULO I: Impacto del cambio climático en la productividad del café (*Coffea arabica*) bajo sistemas agroforestales 1
1.1 Justificación e importancia 1
1.2 Objetivo general 2
1.3 Objetivos específicos 2
1.4 Preguntas de Investigación 2
1.5 Marco conceptual 3
1.5.1 *Sistemas Agroforestales de café en Centroamérica* 3
1.5.2 *Cambio climático e impacto en el cultivo de café* 3
1.5.3 *Modelos de simulación de cultivos* 5
1.5.4 CAF2007 5
1.5.5 Estrategias de adaptación del cultivo de café al cambio climático 9
1.6 Principales resultados 11
1.7 Principales conclusiones 12
2. ARTÍCULO 1. Simulaciones de la producción de café en parcelas de Nicaragua y Costa Rica 16
2.1 Resumen 16
2.2 Introducción 17
2.3 Materiales y métodos 17
2.3.1 Área de estudio 17
2.3.2 Descripción de las fincas de estudio 19
2.3.3 Procedimiento metodológico 21
2.4 Resultados 26
2.4.1 CAF2007 modificado 26
2.4.2 Priorización de parámetros para calibración 28
2.4.4 Calibración de CAF2007 28
2.5.5 Validación 38

2.5 Discusiones 39
2.6 Conclusiones 41
2.7 Literatura citada 42
3. ARTÍCULO II. Modelación de plantaciones de café usando CAF2007 para evaluar la adaptación al cambio climático en Nicaragua y Costa Rica. 44
3.1 Resumen 44
3.2 Introducción 45
3.3 Materiales y métodos 45
3.3.1 Área de estudio 45
3.3.2 Descripción del área de estudio 46
3.3.3 Procedimiento metodológico 47
3.4 Resultados 49
3.4.1 Modificación de cada variable climática 49
3.4.2 Escenarios de cambio climático 53
3.5 Discusiones 54
3.5 Conclusiones 56
3.6 Literatura citada 57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Impacto del cambio climático en el cultivo de café para Nicaragua. 4
Figura 2. Funcionamiento básico del modelo CAF2007..... 7
Figura 3. RMSE para la producción de café (t MS ha-1 y-1) de 12 parcelas de estudio con diferentes calibraciones 11
Figura 4. Análisis de conglomerados y fincas experimentales y cafeteras de estudio en Nicaragua y Costa Rica 18
Figura 5. Inicio de floración simulada con el modelo modificado, sin modificar y floración real en Turrialba, Costa Rica..... 27
Figura 6. Variación bienal de la producción de café simulada por el modelo CAF2007. (1) Modelo original; (2) modelo modificado. 28
Figura 7. RMSE para la producción de café (t MS ha-1 y-1) de las 12 parcelas de estudio. .. 29
Figura 8. Calibración de la producción de café (t MS ha-1 y-1) en la parcela Terminalia amazonia medio convencional. 30
Figura 9. Coeficiente de determinación para la producción de café (t MS ha-1 y-1) en cada parcela calibrada..... 31
Figura 10. Contenido de carbono y nitrógeno en el suelo. 33
Figura 11. RMSE para la producción de café (t MS ha-1 y-1) de 12 parcelas de estudio con diferentes calibraciones 35
Figura 12. Simulaciones de la producción de café (t MS ha-1 y-1) en la parcela Terminalia amazonia - MC con calibraciones individuales, conglomerado (turrialba) y multisitio 35
Figura 13. Coeficiente de determinación para la calibración por conglomerados y multisitio. 36
Figura 14. Calibración individual, por conglomerado y multisitio para el contenido de nitrógeno en el suelo (kg N m-2) en las parcelas de estudio. 37
Figura 15. Calibración individual, por conglomerado y multisitio para el contenido de carbono en el suelo (kg C m-2) en las parcelas de estudio. 38
Figura 16. Parcela de validación Mitch – La hammonia. 38
Figura 17. Simulaciones con parámetros de la calibración multisitio y sin calibrar para la finca cafetera Hammonia – parcela Mitch. 39
Figura 18. Fincas cafeteras del estudio en Nicaragua y Costa Rica..... 46
Figura 19. Concentraciones de CO2 atmosférico para cada escenario de emisión..... 49
Figura 20. Ecología del cultivo. Rango óptimo y marginal de la precipitación y temperatura para el café arábigo. 50
Figura 21. Respuesta de la planta de café al aumento de la temperatura promedio anual en las cosechas 2002 al 2013 para 3 parcelas de Costa Rica y Nicaragua. 51
Figura 22. Respuesta de la planta de café a la disminución de la precipitación promedio anual en las cosechas 2002 al 2013 para 3 parcelas de Costa Rica y Nicaragua. 52
Figura 23. Respuesta de la planta de café al incremento de CO_2 en las cosechas 2002 al 2013 para 3 parcelas de Costa Rica y Nicaragua. 53
Figura 24. Producción promedio anual bajo diferentes concentraciones de CO_2 en la atmósfera para Terminalia amazonia - MC en Turrialba. 54
Figura 25. Producción promedio anual de las cosechas 2040-2054 para Terminalia amazonia MC en Turrialba 54

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Principales países productores de café y porcentaje de uso de árboles en cafetales para Centroamérica en el 2011. 3
Cuadro 2. Variedades de café y productividad bajo sombra de poró, híbridos F1, CR95 y Caturra. (Promedio fan/ha en 7 cosechas: 2004 -2010) 10
Cuadro 3. Tratamientos seleccionados del ensayo de sistemas agroforestales con café de CATIE, Turrialba 19
Cuadro 4. Tratamientos seleccionados del ensayo de sistemas agroforestales con café en Masatepe, Nicaragua. 20
Cuadro 5. Finca cafetera en Llano Bonito, Costa Rica. 20
Cuadro 6. Finca cafetera Aquiares, Costa Rica. 20
Cuadro 7. Variables iniciales requeridas para CAF2007. 21
Cuadro 8. Parámetros de iniciación del modelo CAF2007 en Turrialba, Costa Rica. 22
Cuadro 9. Parámetros de iniciación del modelo CAF2007 en Masatepe, Nicaragua. 22
Cuadro 10. Parámetros de iniciación del modelo CAF2007 en Aquiares y Llano Bonito, Costa Rica. 22
Cuadro 11. Variables de salida para la calibración del modelo CAF2007. 24
Cuadro 12. RMSE de simulaciones de floraciones modificadas y sin modificar. 27

RESUMEN

Diferentes estudios reportan impactos negativos del cambio climático en el cultivo de café, en los cuales se utiliza herramientas de análisis como son los modelos de cultivos. Sin embargo, muchos estudios no tienen en cuenta los procesos que generalmente operan en la planta. CAF2007 es un modelo dinámico de procesos básicos a escala de parcela para sistemas agroforestales de café, el cual simula los rendimientos de café que pueden estar asociados a árboles de sombra o pleno sol.

El modelo requiere de calibraciones para disminuir incertidumbres en los sitios simulados y una posterior validación. En este estudio, se calibró con 12 parcelas repartidas en 3 zonas agroecológicas, fría-húmeda: Llano Bonito; caliente-húmeda: Cartago; y caliente-seca: Masatepe. Se realizaron calibraciones por sitio, por conglomerado climático y para todos los sitios en conjunto (multisitio). Se obtuvieron mejoras en las simulaciones de las parcelas de Turrialba, Llano Bonito y Aquiares y por el contrario se debe trabajar más en las parcelas de Masatepe.

La calibración multisitio reduce las incertidumbres que se presentan al calibrar individualmente de un sitio a otro. La validación del modelo calibrado en la parcela Mitch de la finca la Hammonia demuestra que los parámetros del modelo calibrado multisitio simulan mejor el rendimiento promedio anual de café que los parámetros de un modelo sin calibrar.

El impacto del cambio climático en parcelas con pleno sol y bajo sombra tendrá un efecto negativo o positivo en la producción promedio anual del café dependiendo del tipo de sistema, variedad, tipo de árbol, manejo que se le dé al cafetal, condiciones de sitio y clima. La temperatura, precipitación y CO_2 influyen directamente en los procesos del cultivo. Para el año 2050, la parcela *Terminalia amazonia* con manejo medio convencional en Turrialba y bajo el modelo MIROC5, RCP8.5 y concentraciones de CO_2 de 380 ppm fijadas en el modelo, disminuirá los rendimientos de café; pero si se aumenta las concentraciones de CO_2 a 541 ppm los rendimientos del cultivo de café aumentarán un 10%.

Este efecto se le atribuye a la fertilización del CO_2 ya que la planta hace un mejor uso del recurso hídrico, obtiene más CO_2 y pierde menos agua cuando abre los estomas. Sin embargo, no hay estudios a largo plazo que hablen de otros efectos del CO_2 en la planta y qué otras posibles implicaciones se pueda tener.

ABSTRACT

Different studies that use analysis tools such as crop models, report negative impacts of climate change on coffee cultivation. However, many studies do not consider the processes undergoing inside the coffee plant. CAF2007 is a basic dynamic process model that operates at a parcel level for coffee agroforestry systems, and simulates coffee production rates that may be associated with trees exposed to shades or full sun.

The model requires calibration to reduce uncertainties in simulated sites and requires further validation of the obtained results. In this study, the model was calibrated with 12 parcels spread over three agro-ecological zones, cold-wet: Llano Bonito; hot-wet: Carthage; and hot-dry: Masatepe.

Model calibrations were performed by individual sites, by conglomerate climates, and for all sites combined (multisite). As a result, some improvements were obtained through the simulations for the Turrialba, Llano Bonito and Aquiares' parcels, and it was found that the Masatepe's parcel requires more work.

The multisite calibration reduces the uncertainties that arise when individual calibrations from one place to another are performed. The validation of the calibrated model for the Mitch Hammonia estate´s parcel shows that the multisite model calibration predicts more accurately the average annual production of coffee that the parameters of an un-calibrated model.

The positive or negative effect of climate change on the mean anual coffee production in parcels with sun or shadow will depend on: the type of system, variety, tree type, crop management, climate, and overall site conditions. Temperature, precipitation and CO2 influence directly on the crops process. For 2050, the Terminalia amazonia parcel located in Turrialba with conventional average management and under the MIROC5 model, RCP8.5, will reduce its coffee yield with a CO2 concentration of 380 ppm, but, if the CO2 raised to 541ppm, the coffee yield will have a 10% increase.

This effect is due to CO2 fertilization, because of the higher concentration, the plant will have to open the stoma less time to obtain the same amount of CO2, therefore loosing less water vapor. However, there are no long-term studies referring to the effects of a higher CO2 concentration on the plants, or any other implications.

CAPÍTULO I: Impacto del cambio climático en la productividad del café (*Coffea arabica*) bajo sistemas agroforestales

1.1 Justificación e importancia

El café en Centroamérica representa un rubro de importancia económica que contribuye al producto interno bruto entre el 1-5% (Banco Central de Nicaragua 2012; Banco Central de Costa Rica 2012; Banco Central de Honduras 2013; Banco Central de El Salvador 2013; Banco de Guatemala 2014), genera empleo a millones de familias a lo largo de la cadena de valor y se caracteriza por ser uno lo principales productos de exportación (Bertrand y Rapidel 1999). Costa Rica presenta un descenso de rendimiento del 15% con respecto al promedio entre el periodo de 1990-2011. Estos rendimientos pueden ser afectados por las características del suelo, agua, humedad del aire, flora y fauna. Al igual que la especie de sombra (Van Oijen *et al.* 2009), variedad (Bertrand y Rapidel 1999), manejo del cultivo, otros factores climáticos y variaciones de los precios internacionales (Bertrand y Rapidel 1999).

El cambio climático también juega un papel importante, ya que alteraciones en el clima repercuten directamente en el ciclo del cultivo. Aumentos de temperatura y cambio en los regímenes de precipitación, que predicen los modelos de circulación global (GCM), tendrán un efecto desfavorable en las regiones de crecimiento tradicional del café; pero también habrán zonas con condiciones aptas para el desarrollo del café (Läderach *et al.* 2011).

La investigación agrícola busca tener en cuenta estos factores por medio de herramientas como son los modelos de simulación (nicho, modelos de procesos básicos, fisiológicos). Los modelos de cultivos se caracterizan por entender la complejidad (Hernández *et al.* 2009; Rapidel *et al.* 2009), y representar por medio de ecuaciones matemáticas los procesos fisiológicos y ecológicos más importantes del crecimiento del cultivo (UNE, 2009).

Los modelos son una herramienta que puede ser utilizada de manera eficiente para evaluar razonablemente los servicios y con ello los costos, evaluar riesgos y prever la adaptación al cambio climático en la exploración de escenarios futuros y para la elaboración de estrategias relevantes (Rapidel *et al.* 2009). Investigaciones han identificado diferentes estrategias de adaptación frente al cambio climático como desarrollo/selección de variedades resistentes al clima (Schepp 2010; Läderach *et al.* 2011), diversificación (Läderach *et al.* 2010a), riego y reforestación (Schepp 2010), entre otros. Sin embargo, muchos modelos de simulación al predecir el impacto del cambio climático en café no incluyen el aumento del CO_2 (Rapidel y Van Oijen 2009) ni integran las estrategias de adaptación. El modelo CAF2007, desarrollado por Van Oijen *et al.* (2009) incluye las interacciones de la temperatura, precipitación y fertilización además de considerar sombra, contenido de nitrógeno - carbono, área foliar y cambios de fenología del café en el tiempo (Rapidel y Van Oijen 2009).

Con el presente trabajo, utilizando como herramienta el modelo CAF2007, se busca evaluar el impacto del cambio climático en la productividad de café bajo sistemas agroforestales y su efecto en Caturra para Costa Rica y Nicaragua. Se calibró, validó y evaluó CAF2007, realizando simulaciones de productividad con diferentes manejos y condiciones

climáticas. Se evaluó el modelo como una herramienta útil para simular la producción de café en otras zonas agroecológicas del país diferentes a las calibradas en el desarrollo del proyecto.

1.2 Objetivo general

Evaluar el impacto del cambio climático en la productividad de café bajo sistemas agroforestales para la variedad Caturra en Costa Rica y Nicaragua.

1.3 Objetivos específicos

- Calibrar el modelo CAF2007 con los datos experimentales históricos recolectados en fincas cafeteras (zonas) de Costa Rica y Nicaragua.

- Validar el modelo CAF2007 con los datos de fincas cafeteras de la zona calibrada para Costa Rica y Nicaragua.

- Estimar la capacidad del modelo CAF2007 para evaluar el impacto del cambio climático en las zonas cafeteras de Costa Rica y Nicaragua.

1.4 Preguntas de Investigación

- ¿Será posible calibrar el modelo CAF2007 únicamente en tres zonas agroecológicas en América Central y usarlo como una herramienta útil en la evaluación del cambio climático para otras zonas agroecológicas de América Central?

- ¿Será posible que la incertidumbre que generó cuando tomó los coeficientes medios es todavía suficientemente baja para usar el modelo en América Central?

- ¿Es realmente necesario hacer simulaciones del modelo CAF2007 para estrategias de adaptación existentes?

- ¿Representa CAF2007 una mejor herramienta de simulación de producción de café que otros modelos existentes?

1.5 Marco conceptual

1.5.1 *Sistemas Agroforestales de café en Centroamérica*

A nivel mundial, los países productores de café en Centroamérica se ubican dentro de los 15 primeros puestos en producción (ICO 2011); en su mayoría, presentan diferentes especies de árboles en el cafetal. Costa Rica y Nicaragua tienen entre un 75 y 94% -respectivamente- del área sembrada con café bajo sistemas agroforestales (Cuadro 1) con rendimientos cerca a los 0.97t/ha. Los sistemas agroforestales (SAF) poseen muchas ventajas sobre los monocultivos para responder a la demanda de una agricultura multifuncional; proveen servicios medioambientales importantes, valores estéticos; amortiguan áreas protegidas y turismo ecológico (Beer *et al.* 2003).

A pesar que entidades de café en diversos países han ofertado los cafetales como monocultivo, los agricultores han sabido reconocer las ventajas del uso de árboles en los cafetales, por lo que han mantenido sus tradiciones por los beneficios obtenidos frente al monocultivo. Esto se pudo evidenciar en la región noroeste de Brasil, en la cual desde finales del siglo XIX se observó que en el cambio de estaciones los cafetos que se encontraban a plena exposición solar morían, mientras que aquellos que se encontraban bajo sombra resistían (Seoares y Aguiar 2001).

Cuadro 1. Principales países productores de café y porcentaje de uso de árboles en cafetales para Centroamérica en el 2011.

PRODUCCIÓN MUNDIAL				**ÁRBOLES EN CAFÉ**	
Países	**Total área cosechada (ha)**	**Producción (t)**	**Producción (%)**	**Área café con árboles (%)**	**Fuente**
Guatemala	249.916	242.839	2,18	Si	
Nicaragua	121.509	103.664	0,93	94	(Virginio-Filho y Abarca-Monge 2008)
Costa Rica	98.861	99.909	0,90	75	(Virginio-Filho y Abarca-Monge 2008)
El Salvador	152.340	82.095	0,74	95	(Blackman *et al.* 2006) y (Virginio-Filho y Abarca-Monge 2008)
Panamá	28.119	12.011	0,11	Si	(Pastrana *et al.* 1999)
Belice	45	45	0,01	-	
Total	**915.688**	**822.924**	**7,40**		

1.5.2 *Cambio climático e impacto en el cultivo de café*

El equilibrio energético del sistema climático se ha venido alterando por las variaciones de las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) y aerosoles así como variaciones

de la cubierta terrestre. Alteraciones que son contribuidas a la actividad humana (Myhre *et al.* 2013)

Estas concentraciones han provocado un calentamiento del sistema climático, reflejado en el aumento de las temperaturas medias globales (como lo indican los modelos de circulación global - GCM), de las temperaturas del aire en superficie y en los océanos, en extendida fusión de nieve y hielo y el aumento del nivel medio del mar. Lo anterior causa impactos drásticos, afecta sistemas y sectores como es la agricultura en tierras de baja elevación (IPCC 2007).

Muchos caficultores han notado el efecto del cambio del clima sobre sus cultivos; así lo perciben agricultores de Nicaragua, quienes mencionan cambios en la estacionalidad y predicción del clima, estaciones secas más largas y calientes (Baca *et al.* 2014). Señalaron que tienen problemas con sus cosechas, al tener floraciones dispersas, maduración incompleta y caída del fruto por las fuertes lluvias (Baca Gómez 2011).

Los modelos climáticos muestran cambios en el patrón de precipitaciones y temperatura, sin embargo, estos cambios son específicos para cada región cafetera. Así lo demuestran diferentes estudios que se han realizado del impacto de cambio climático en la adaptabilidad de café en Nicaragua (Läderach *et al.* 2010b), México (Schroth *et al.* 2009; Morales *et al.* 2012), El Salvador, Costa Rica, Honduras y Guatemala (Läderach *et al.* 2010a; Haggar y Schepp 2011), donde las áreas aptas del cultivo se reducirán y se verán obligadas a ascender en altitud. Es así que Nicaragua (Figura 1) y Costa Rica tienen más del 40% de pérdida de aptitud del cultivo convirtiéndose en los más afectados de Centroamérica (Läderach *et al.* 2010a).

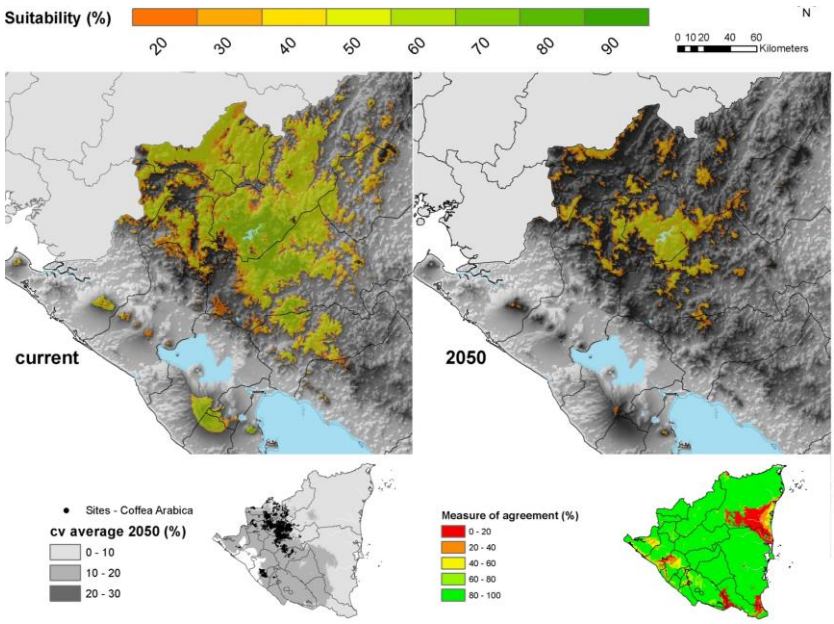

Figura 1. Impacto del cambio climático en el cultivo de café para Nicaragua.
Fuente. Läderach *et al.* (2010a)

1.5.3 *Modelos de simulación de cultivos*

Los modelos de cultivos nacieron hace 30 años como una alternativa de análisis de sistemas y presentándose como nuevas técnicas para científicos de cultivos (Sinclair y Seligman 1996). La simulación de esto modelos pretende imitar el mundo real, ya que representa los procesos complejos (Sinclair y Seligman 1996) y necesarios para que el modelo opere (Montoya *et al.* 2009). Pueden ser usados para simular los impactos potenciales de los factores ambientales en los ecosistemas naturales y en la agricultura; estos pueden usar un conjunto de prácticas de gestión, cambios específicos en la temperatura, CO_2 u otros factores abióticos (White *et al.* 2011).

Más de 111 documentos utilizan modelos que son usados en la determinación del impacto del cambio climático en los cultivos, mientras que 74 documentos consideran adaptación o metodologías en combinación entre impacto y adaptación (White *et al.* 2011).

En café, se han utilizado modelos simples como Ecocrop, mecanísticos como MaxEnt, sistemas de ayuda en la decisión espacial como Canasta y se ha modelado la distribución de la especie como Bioclim y Domain para simular probabilidad de presencia del cultivo en una zona geográfica determinada y su impacto a futuro.

Modelos que simulan el crecimiento y desarrollo de la planta de café como son los dinámicos como CAF2007 (Van Oijen *et al.* 2009) y ecofisilógicos como MAESTRA/MAESPA (Duursma y Medlyn 2012; Charbonnier 2013; Charbonnier *et al.* 2013), se caracterizan por simular los efectos de los cambios de las diferentes variables susceptibles a variaciones en el futuro, que no han sido usados para la estimación de impactos del cambio climático, y este trabajo es el primer intento de calibrar uno de los modelos existentes, CAF2007, para estimar estos impactos.

Otros modelos de procesos son los usados para simular la producción potencial del cultivo de café en Colombia (Montoya *et al.* 2009) y el modelo de agroecosistemas de café (Rodríguez *et al.* 2011).

1.5.4 CAF2007

CAF2007 (Van Oijen *et al.* 2010b) es un modelo dinámico de procesos básicos a escala de parcela para sistemas agroforestales de café. Tiene como objetivo modelar el rendimiento del café asociado a árboles específicos por sitio (principalmente 6 especies), teniendo en cuenta los mecanismos y procesos que generalmente operan en la planta (Van Oijen *et al.* 2010b).

Para el desarrollo de este modelo, Van Oijen (2010) hizo una extensiva revisión de literatura dividida en secciones de vegetación (café, arboles) y variables ambientales (suelo y clima). El modelo tiene en cuenta la luz, agua y nitrógeno y está limitado únicamente por el suelo, condiciones climáticas y el manejo por sitio. CAF2007 se vuelve más complejo cuando tiene en cuenta efectos del árbol de sombra al café como es la competencia por los recursos de CO_2, luz, agua y nutrientes, especialmente por el volumen que ocupan las raíces en el

suelo; pero también considera el aporte que hace a la hojarasca con las podas y raleos (Van Oijen *et al.* 2010a).

Simula procesos como balance de carbono, balance de agua y balance de nitrógeno. Simula los procesos en los cuales interviene el uso eficiente del agua en la producción o en la fotosíntesis que puede verse afectado con el aumento del CO_2. CAF2007 responde a decisiones de estrategias de manejo como dosis de fertilización, densidad y especies de sombra, régimen de podas, raleos y cambio climático (Van Oijen *et al.* 2010a).

Las variables para modelar el café pueden obtenerse de revisión de literatura, levantamiento en campo u obtenerlos de imágenes satelitales. Estas se usan dependiendo de la disponibilidad y de los recursos para poder obtener las variables/parámetros, así como la escala a la cual se desarrolla y extrapola el modelo.

CAF2007 integra 6 variables de clima, 7 variables iniciales para café, 6 variables iniciales de árboles, 8 variables iniciales para suelo y 102 parámetros de café, suelo, árboles, sitio, condiciones atmosféricas y clima.

El modelo divide la plantación de café en dos grandes secciones (Figura 2): pleno sol y sombra. La primera integra 4 componentes: suelo, planta de café, recursos debajo y encima del suelo.

Estos componentes tienen el objetivo de representar los recursos del agua, contenido de C y N en el suelo, cantidad de agua disponible y suministro de N. También calcula algunas características fisiológicas y fenológicas de la planta de café como es la fenología, crecimiento, follaje, senescencia y poda-cosecha.

En la sección de sombra, además de tener en cuenta los 4 componentes de pleno sol, integra la sombra y el árbol. Este último tiene en cuenta la morfología, la asignación de carbohidratos, la producción primaria neta de N, el crecimiento del árbol y la captación de N, así como el C y N de los árboles. El compartimiento de la sombra es importante, ya que se encarga de simular los efectos de la sombra en el sistema y permite calcular la fracción de área de la parcela con sombra y pleno sol.

En la sección de sombra, el modelo tiene en cuenta el efecto de los árboles en los procesos de evaporación, pérdida de agua y en los reservorios del suelo; ya que influye directamente en la intercepción de luz y agua, así como la competencia de N y agua.

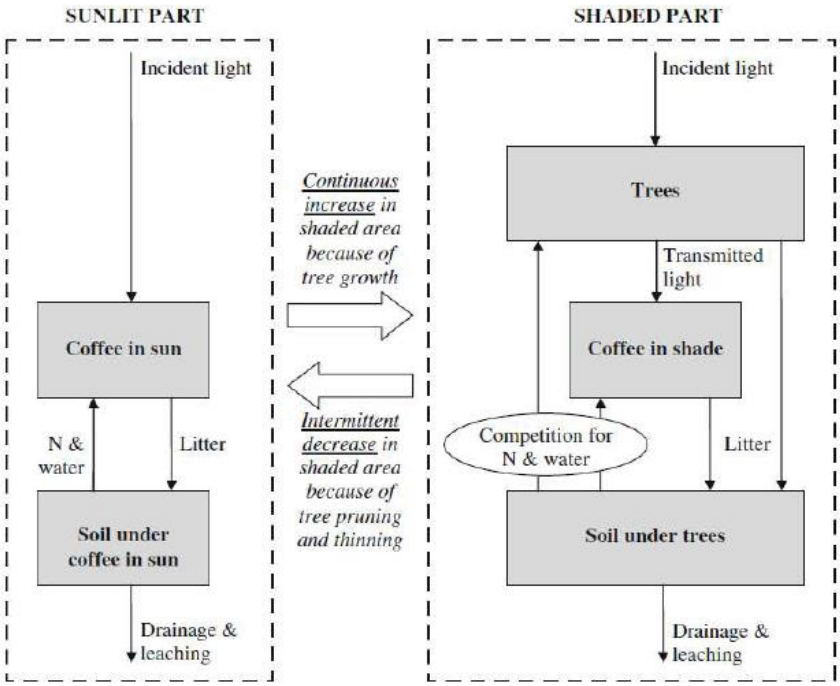

Figura 2. Funcionamiento básico del modelo CAF2007.
Fuente. Van Oijen *et al.* (2010a)

El modelo tiene limitantes, pues no tiene en cuenta el efecto de las plagas y enfermedades, trabaja solo con una sola especie de sombra, excluye los efectos tóxicos del suelo y polución de aire.

Calibración del modelo CAF2007

El modelo de procesos básicos (CAF2007), al ser determinístico, busca representar el mundo real a partir de leyes físicas determinadas. Sin embargo, hay un desconocimiento de todos los procesos que ocurren en la interacción planta-suelo-atmosfera, y que se representa por medio de distribuciones de probabilidades (Van Oijen 2005).

Estas incertidumbres se pueden reducir si se realiza una calibración en sitios experimentales del estudio y necesaria para extrapolar el modelo a otras fincas cafeteras. CAF2007 se comporta mejor en zonas húmedas tropicales que en zonas cálidas demostrando que se requiere información precisa para simular la dinámica de agua del sistema; así como también mejorar la relación nitrógeno (Remal 2009).

El modelo necesita de valores de entrada específicos por sitio para obtener mejores simulaciones (Remal 2009). Para calibrar estos valores, el método bayesiano se vuelve una herramienta útil; pues usa los datos de salida como información *a priori* en valores de parámetros.

La calibración bayesiana requiere de recursos computacionales altos, por lo cual no es tan implementada; sin embargo, Van Oijen (2005) utiliza técnicas de la cadena de Markov que ayudan a mejorar este inconveniente.

Según Barrera y Correa (2008) "la estadística bayesiana permite la incorporación de información no muestral sobre características desconocidas del fenómeno en estudio". Los métodos bayesianos implican una cierta forma de subjetividad, ya que se debe definir una distribución de probabilidad *a priori* de los parámetros (Meylan 2012).

El estado del teorema bayesiano $P(\Theta|D) = P(D|\Theta) * P(\Theta)$ establece:

- $P(\Theta|D)$ es conocido como *posteriori*. Muestra el rango de valores positivos para parámetros θ y la probabilidad de cada vector con este rango.
- $P(D|\Theta)$ es la función de verosimilitud.
- Es el *prior* $P(\Theta)$, la distribución de probabilidad de parámetros

En la calibración con enfoque bayesiano, los parámetros se definen como variables aleatorias y las distribuciones de los parámetros anteriores y posteriores representan la declaración acerca de valores de los parámetros antes y después de la observación de datos (Van Oijen 2008).

Para la calibración bayesiana, se debe tener en cuenta la distribución de los parámetros *a posteriori* como una muestra representativa de los valores de los parámetros. Para esto, se usa el método MCMC – Markov chain Monte Carlo (Monte Carlo por cadenas de Markov), por ser simples y no requerir de conocimiento previo de la forma de la distribución *a posteriori* (Van Oijen 2005). Es un método para hacer la calibración bayesiana (Van Oijen 2008). Los MCMC son básicamente como un experimento que recurre al uso de muestras generadas de forma aleatoria o pseudoaleatoria con el fin de evaluar una expresión matemática (Prado 2004). Permiten la resolución de problemas que hasta entonces no eran analíticamente tratables y precisaban distintas aproximaciones numéricas, el carácter probabilístico de las funciones implicadas. En este caso, el problema es la calibración de CAF2007 basados en procesos, y estos modelos son deterministas.

Cómo funciona

El aspecto iterativo del algoritmo le permite "caminar por el espacio de parámetros" al probar diferentes combinaciones (o vectores) de valores de parámetros (Van Oijen 2008). El algoritmo comienza con un vector de parámetro inicial vector Θ_0. En cada iteración, un "candidato" vector de parámetro se genera en el espacio de parámetros con n dimensiones (siendo n el número de parámetros). Este candidato se genera mediante la adopción de un "paso" lejos del vector actual, el ancho de los cuales depende de la incertidumbre de cada parámetro (Meylan 2012).

Para escoger el vector del parámetro, se inicia al azar, después de miles de interacciones y la exploración del espacio de los parámetros, se comienzan a definir zonas con "mayor probabilidad" y existe una mayor probabilidad de que vectores de parámetros se encuentren allí (Meylan 2012). Si la probabilidad es más de 50% se acepta el vector de parámetros candidato. Por lo tanto, el rango de los valores y la media que se encuentran en esa zona son

utilizados para actualizar los valores de parámetros del modelo, sabiendo que estos son la combinación óptima que permite que el modelo pueda simular los datos observados (Van Oijen 2008).

La calibración bayesiana se puede realizar en un sitio o en multisitio. La calibración multisitio tiene en cuenta las diferentes parcelas y disminuye fuertemente el error del modelo para la mayoría de los parámetros; sin embargo, es mayor que el error medio calibrado en una sola parcela o sitio (Reinds *et al.* 2008). Esto se debe a la cantidad de observaciones provenientes de las parcelas que convergen y, por lo tanto, se reduce el espacio de las incertidumbres de los posteriores. Calibrando en varios sitios, se tiene que distinguir cuidadosamente los parámetros comunes a las calibraciones de los parámetros específicos de cada sitio.

1.5.5 Estrategias de adaptación del cultivo de café al cambio climático

Las estrategias de adaptación incluyen iniciativas y prácticas para reducir la vulnerabilidad de agro-ecosistemas al cambio climático (De Camargo 2010), hacen referencia al conjunto de opciones o elecciones del repertorio cultural e intercultural que se llevan a cabo para lograr un objetivo individual o colectivo (Zuluaga Sánchez *et al.* 2013). El uso de estrategias de adaptación varía a través de diferentes estudios, según White *et al.* (2011) 116 estudios consideran adaptación, 73 por lo menos varían en dos manejos y solo 31 documentos reportan el uso de rutinas de *software* que evalúan la temperatura/ humedad diarios del suelo para determinar las condiciones permitirían la siembra del cultivo.

Según De Camargo (2010) algunas prácticas de adaptación son:

- Cambiar variedades.
- Alterar la distribución o manejo de actividades del cultivo.
- Manejo efectivo de plagas.
- Prácticas de manejo de hierbas y enfermedades.
- Hacer mejor uso de los recursos.
- Manejo de sombra.
- Riego.
- Necesidades genéticas.

Otros autores como Läderach *et al.* (2010a) aseguran que muchas estrategias de adaptación consisten en medidas técnicas que serían provechosas, así no se orienten hacia el cambio climático, resalta que el riego, variedades resistentes a sequía y calor y doseles de sombra son medidas iniciales que se deben llevar a cabo y serían cruciales. Otros autores resaltan estrategias locales como describe Schroth *et al.* (2009) en Sierra Madre, Chiapas, al intervenir en la cadena de mercado, subsidios y políticas.

Este documento se centra en tres alternativas de adaptación: variedad de café, tipo y manejo de sombra.

Variedad de café: La elección de variedades mejoradas es fundamental para el incremento de la productividad de cafetales, ya que la predisposición genética de la variedad escogida, no solo influirá en la producción, sino que además le brindará características de resistencia o susceptibilidad a determinadas plagas o enfermedades.

En el ensayo de café a largo plazo en el CATIE (Cuadro 2), se puede apreciar cómo influye la variedad en el desarrollo y productividad del cafetal; pues si bien es cierto todas las variedades utilizadas en el ensayo han sido sometidas a los mismos tratamientos, en determinados tratamientos y bajo ciertas asociaciones con leñosas perennes, los resultados de la variedad escogida (caturra) han sido inferiores, en comparación con la variedad CR95 y los híbridos de café H-F1-Centroamérica y H-F1-Milenio, los cuales han respondido mejor bajo condiciones de poca fertilidad (Virginio-Filho y Haggar 2005).

El manejo bajo orgánico presenta mayores producciones que el medio convencional en la repetición 1, porque la bienalidad del café es más acentuada. La planta queda más estresada en medio convencional que en bajo orgánico.

Esta situación pasó en la cosecha de 2005 cuando la producción del medio convencional fue muy grande (31 fan/ha) y al siguiente año presentó 3fan/ha. Mientras que en el manejo bajo orgánico en 2005 tuvo una cosecha de 19.7fan/ha y al siguiente año 37.5fan/ha.

Cuadro 2. Variedades de café y productividad bajo sombra de poró, híbridos F1, CR95 y Caturra. (Promedio fan/ha en 7 cosechas: 2004 -2010)
Fuente: Virginio-Filho y Haggar (2005)

Variedades	Sombra – Repetición 1		Sombra – Repetición 2	
	Manejo			
	Medio Convencional	Bajo Orgánico	Medio Convencional	Bajo Orgánico
Caturra	17,9	27,26	24,38	23,39
CR95	23,7	34,41	45,29	43,34
H-F1-Centroamérica	49,5	46,77	---	----
H-F1-Milenio			29,83	69,55

Tipo de sombra: En el diseño de cafetales, la elección de la especie leñosa perenne ocupa un lugar importante; pues dependiendo de la especie, esta brindará una mayor cantidad de bienes (frutos, madera, resinas y otros) y servicios como sombra, almacenamiento de carbono, ciclaje de nutrientes, aporte a la biodiversidad (Beer *et al.* 1998).

Manejo de la sombra: El manejo de la sombra es otro factor a ser considerado en el momento de diseñar los cafetales, pues esta estará condicionada no solo por la especie utilizada, sino además por los objetivos del productor y por la cantidad de recursos con los que cuente para realizar este tipo de actividades. Los árboles en cafetales brindan al agricultor la posibilidad de proteger sus cultivos de las fluctuaciones del clima, mediante un manejo adecuado de la copa de los árboles.

Se debe entender que las necesidades de sombra varían de acuerdo con la latitud, el clima, la temperatura, la variedad de café y el tipo de manejo, es por eso que el manejo de sombra sugerido no puede ser único. Sin embargo, los criterios a considerar para el diseño y manejo de sombra en cafetales pueden aplicarse a diversos tipos de cafetales.

Según Fernández y Muschler (1999) para decidir si se debe manejar o no con sombra los cafetales, se debe considerar tres grupos de factores: objetivos del productor, factores ambientales del cafetal y los insumos al alcance del productor. Estos criterios podrían considerarse también para escoger el manejo de la sombra en el cafetal.

El análisis de interacciones árbol-café es de suma importancia para el manejo de sombra. Para realizar este análisis de interacciones, es importante conocer las especies involucradas en el sistema. Virginio-Filho y Haggar (2005) proponen realizar una evaluación de los árboles en cafetales, esta evaluación toma en cuenta las características deseadas de los árboles para cafetales y permite conocer si los árboles existentes en el sistema cumplen con las características deseadas.

Este conocimiento es de gran utilidad en el momento de manejar la sombra, pues con los datos de forma, densidad y tamaño de copa se puede diseñar los arreglos espaciales para mantener una sombra adecuada en todas las etapas del cultivo.

1.6 Principales resultados

El presente trabajo tiene como principales resultados:

- Modificación del modelo CAF2007 en el módulo de floración.
- Modificación en dos parámetros de fuerza de sumidero de los granos de café.
- Calibración por sitio del modelo CAF2007 para 3 zonas agroecológicas (Figura 3).
- Calibración multisitio del modelo CAF2007 para 3 zonas agroecológicas (Figura 3).

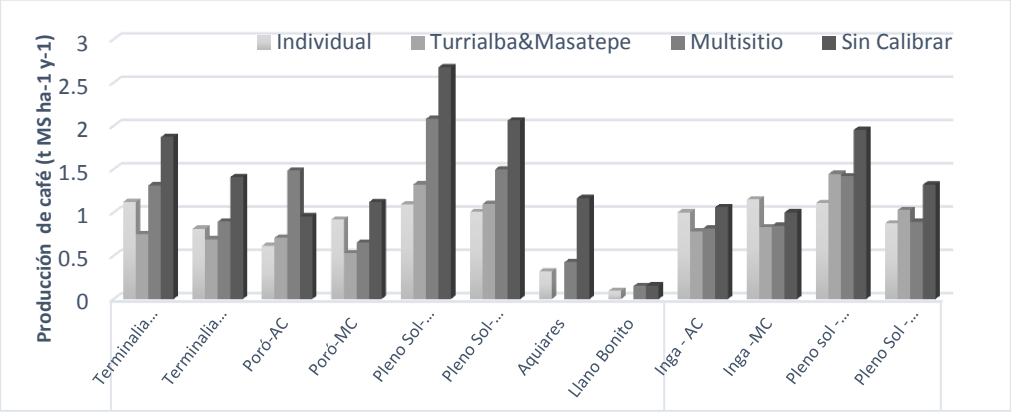

Figura 3. RMSE para la producción de café (t MS ha-1 y-1) de 12 parcelas de estudio con diferentes calibraciones *Individual se refiere a la calibración por cada sitio; Turrialba&Masatepe es la calibración por cada uno de los conglomerados; multisitio es la calibración en todas las parcelas; sin calibrar es la simulación con los datos por defecto.*

- Calibración del modelo CAF20007 con altos valores de R^2 para Turrialba, Aquiares y Llano Bonito.

- Validación del modelo CAF2007 calibrado en la finca cafetera Mitch de Nicaragua mejorando el valor de RMSE de 0.8 (sin calibrar) a 0.45 (calibrado).
- El impacto de aumentar gradualmente la temperatura, disminuir la precipitación y aumentar las concentraciones de CO_2 en el modelo CAF2007 puede afectar positiva o negativamente las plantas de café dependiendo de las condiciones del sitio.
- Utilizando el modelo de circulación global MIROC5 bajo un escenario RCP8.5 y aumentando las concentraciones de CO_2 en el modelo CAF2007, se predice un aumento de 10% de la producción de las plantas de café.

1.7 Principales conclusiones

- La simulación de la producción de café (t MS ha-1 y-1) con el modelo original subestima la producción notablemente, mientras que el modelo calibrado mejora las producciones bajando el RMSE.
- Las calibraciones por conglomerado expresan diferentes RMSE, lo cual mejora en general las producciones simuladas al igual que la calibración multisitio frente al modelo original (sin calibrar).
- La calibración por conglomerados – Turrialba - tiene un R2 alto de 0.71 mientas que la calibración por conglomerado – Masatepe - es bajo 0.2, siendo que el modelo calibrado se ajusta mejor a las producciones medidas en Turrialba y caso contrario en Masatepe.
- Las producciones simuladas con el modelo CAF2007 en la parcela Mitch (validación) demuestran que se obtuvo un mejor RMSE 0.45 para la parcela simulada con los parámetros calibrados por multisitio que sin calibrar (RMSE 0.85).
- Un aumento de la temperatura promedio anual de 5°C afecta las producciones promedio anual de las parcelas a pleno sol que las parcelas con árboles de sombra. Para las parcelas con sombra, la producción promedio anual puede variar dependiendo de la especie de árbol y el área de sombra.
- Menores precipitaciones afectan negativa o positivamente la producción promedio anual de la planta de café; dependiendo de las condiciones de cada sitio y la cantidad de milímetros disminuidos.
- El aumento de CO_2 en la planta de café tiene un efecto de fertilización que incrementa las producciones promedio anual en las parcelas de estudio.
- Hay que tener cuenta que el modelo CAF2007 dentro de sus procesos no incluye otras limitaciones que pueden afectar la producción de café y no tiene la función de modelar el CO_2 a través del tiempo ni las interacciones que puede tener sobre otras partes de la planta, ya que aún no se reportan estudios a largo plazo sobre el efecto del CO_2 en la ecofisiología de la planta.

1.7 Literatura citada

Baca Gómez, M. 2011. Identificación de la vulnerabilidad en los medios de vida de las familias cafetaleras y sus posibles estrategias de adaptación al cambio climático en el norte de Nicaragua. Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

Baca, M.; Läderach, P.; Haggar, J.; Schroth, G.; Ovalle, O. 2014. An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. PLoS ONE. 9(2): e88463. Disponible en http://dx.doi.org/10.1371%2Fjournal.pone.0088463 10.1371/journal.pone.0088463

Barrera, C.; Correa, J. 2008. Distribución predictiva bayesiana para modelos de pruebas de vida vía MCMC. Revista Colombiana de Estadística. 31(2): 145-155.

Beer, J.; Muschler, R.; Kass, D.; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *In* Nair, P.K.R.; Latt, C.R. eds. 1998. Directions in Tropical Agroforestry Research. Springer Netherlands. p. 139-164. (Forestry Sciences). Disponible en http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-9008-2_610.1007/978-94-015-9008-2_6

Beer, J.; Harvey, C.; Ibrahim, M.; Harmand, J.M.; Somarriba, E.; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. Agroforestería en las Américas. 10(37-38): 80.

Bertrand, B.; Rapidel, B. 1999. Desafíos de la caficultura en Centroamérica San José, CR, Agroamerica.

Charbonnier, F. 2013. Measuring and modelling light, water and carbon budgets and net primary productivity in a coffee-based agroforestry system of Costa Rica. PhD. Ecole doctorale RP2E. Université de Nancy 54 p.

Charbonnier, F.; le Maire, G.; Dreyer, E.; Casanoves, F.; Christina, M.; Dauzat, J.; Eitel, J.U.H.; Vaast, P.; Vierling, L.A.; Roupsard, O. 2013. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (Coffea arabica L.) agroforestry system. Agricultural and Forest Meteorology. 181(0): 152-169. Disponible en http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192313001901 http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.07.010

De Camargo, M.B.P. 2010. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. Bragantia. 69(1): 239-247.

Duursma, R.A.; Medlyn, B.E. 2012. MAESPA: a model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to [CO2] × drought interactions. Geosci. Model Dev. 5(4): 919-940. Disponible en http://www.geosci-model-dev.net/5/919/2012/ 10.5194/gmd-5-919-2012

Fernández, C.; Muschler, R.G. 1999. Aspectos de la sostenibilidad de los sistemas de cultivo de café en América Central. Desafíos de la Caficultura en Centroamérica. 69-96.

Guatemala, B.d. 2014. Producto interno bruto medido por el origen de la producción. Disponible en http://www.banguat.gob.gt/inc/main.asp?id=112793&aud=1&lang=1

Haggar, J.; Schepp, K. 2011. Coffee and Climate Change. Desk study: impacts of climate change in four pilot countries of the coffee and climate initiative. Hamburg: Coffee and Climate.

Hernández, N.; Soto, F.; Caballero, A. 2009. Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. Cultivos tropicales. 30(1): 00-00.

Honduras, B.C.d. 2013. Producto interno bruto enfoque de la producción en valores corrientes y constantes. Disponible en http://www.bch.hn/pib_base2000.php

ICO (Organización Internacional de café, Inglaterra). 2011. Datos de producción histórica a nivel mundial. Disponible en http://www.ico.org/es/new_historical_c.asp

IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, UK). 2007. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Pachauri, R.; Reisinger, A. eds. IPCC, Ginebra, Suiza,

Läderach, P.; Haggar, J.; Lau, C.; Eitzinger, A.; Ovalle-Rivera, O.; Baca, M.; Jarvis, A.; Lundy, M. 2010a. Mesoamerican coffee: Building climate change adaptation strategy CIAT, Cali, Colombia., (CIAT, Policy brief No. 2)

Läderach, P.; Schepp, K.; Ramírez, J.; Jarvis, A.; Eitzinger, A. 2010b. Impacto del cambio climático para el cultivo de café en Nicaragua. *In*. 2010b. Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina. Publicación CATIE 99, Turialba, Costa Rica: Centro Tropical Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. p. 54.

Läderach, P.; Lundy, M.; Jarvis, A.; Ramírez, J.; Portilla, E.; Schepp, K.; Eitzinger, A. 2011. Predicted impact of climate change on coffee supply chains. *In* Leal Filho, W. ed. 2011. The economic, social and political elements of climate change. Springer Berlin Heidelberg. p. 703-723. (Climate Change Management). Disponible en http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0_4210.1007/978-3-642-14776-0_42

Meylan, L. 2012. Design of cropping systems combining production and ecosystem services: developing a methodology combining numerical modeling and participation of farmers. pH.D. Montpellier. 122 p.

Montoya, E.C.; Arcila Pulgarin, J.; Jaramillo Robledo, Á.; Riaño Herrera, N.M.; Quiroga Zea, F. 2009. Modelo para simular la producción potencial del cultivo del cáfe en Colombia. Chinchiná, Caldas, Colombia., Cenicafé. 52 p. (Boletin técnico) (33).

Morales, M.; Virginio-Filho, E.d.M.; León, C.J.; Tinoco, J.Á.; Hills, T.; Vásquez Vásquez, A.; Castro, J.C.; Vásqeuz, J.J.; Alva., A.; Aguilera, M.; Van Dyck, R.; Roblero, L.; Osorio, E.; Flores, E.; Line, F.; Gudiño, L.; Zenteno, J.C.; Mendoza, O.E. 2012. Estrategia del sector cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en la Sierra Madre, Chiapas CATIE,

Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F.-M.; Collins, W.; Fuglestvedt, J.; Huang, J.; Koch, D.; Lamarque, J.-F.; Lee, D.; Mendoza, B.; Nakajima, T.; Robock, A.; Stephens, G.; T., T.; Zhang, H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; V., B.; Midgley, P.M. eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., (Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)

Nicaragua, B.C.d. 2012. Principales indicadores macroeconómicos. Disponible en http://www.bcn.gob.ni/pim/index.php

Pastrana, A.; Lok, R.; Ibrahim, M.; Víquez, E. 1999. El componente arbóreo en sistemas agroforestales tradicionales de los indígenas Ngöbe, La Gloria, Changuinola, Panamá. Agroforestería en las América. 6(23): 69-71.

Rapidel, B.; Roupsard, O.; Navarro, M. 2009. Introduction to the workshop. *In* Workshop on Modelling Agroforestry Systems (Turrialba, Costa Rica) 2009. Rapidel, B.; Roupsard, O.; Navarro, M. eds. p. 17-20.

Rapidel, B.; Van Oijen, M. 2009. Coffee productivity, ecosystem services provision and adaptation to climate change: how useful can be a model? ICRAF, Nairobi, Kenya, (Second World Congress of Agroforestry.)

Reinds, G.J.; Van Oijen, M.; Heuvelink, G.B.M.; Kros, H. 2008. Bayesian calibration of the VSD soil acidification model using European forest monitoring data. Geoderma. 146((3-4)): 475-488. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.06.022

Remal, S. 2009. Conceptual and numerical evaluation of a plot scale, process-based model of coffee agroforestry systems in Central America: CAF2007 CATIE, 40 p. (Bruno Rapidel, Aurélie Metay)

Rica, B.C.d.C. 2012. Producto interno bruto y valor agregado por industria. Disponible en http://www.bccr.fi.cr/

Rodríguez, D.; Cure, J.R.; Cotes, J.M.; Gutiérrez, A.P.; Cantor, F. 2011. A coffee agroecosystem model: I. Growth and development of the coffee plant. Ecological modelling. 222(19): 3626-3639. Disponible en http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380011004200 http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.08.003

Salvador, B.C.d.E. 2013. Producto Interno Bruto (PIB) por Rama de Actividad Económica. A Precios Constantes de 1990. Disponible en http://www.bcr.gob.sv/bcrsite/?cat=1000&title=Base%20de%20Datos%20Econ%C3%B3mica-Financiera&lang=es

Schepp, K. 2010. How can small-scale coffee and tea producers adapt to climate change, AdapCC. (Final Report - Result and Lessons)

Schroth, G.; Läderach, P.; Dempewolf, J.; Philpott, S.; Haggar, J.; Eakin, H.; Castillejos, T.; Moreno, J.G.; Pinto, L.S.; Hernández, R. 2009. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 14(7): 605-625.

Seoares, L.; Aguiar, O. 2001. Cultivo de café bajo sombra en el Ceará, Brasil. Agroforestería de las Américas. 8(32): 1.

Sinclair, T.R.; Seligman, N.a.G. 1996. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. Agron. J. 88(5): 698-704. Disponible en https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/88/5/698 10.2134/agronj1996.00021962008800050004x

UNE(Universidad Nacional Entre Rios, Argentina). 2009. Modelos de cultivos. Disponible en http://www.cicyttp.org.ar/climatologiafca/docencia/apuntes/tema10.pdf

Van Oijen, M.; Dauzat, J.; Harmand, J.-M.; Lawson, G.; Vaast, P. 2009. Plot-scale modelling of coffee agroforestry systems in Central America. Modelling Agroforestry Systems. 191-202.

_____. 2010a. Coffee agroforestry systems in Central America: II. Development of a simple process-based model and preliminary results. Agroforestry systems. 80(3): 361-378.

_____. 2010b. Coffee agroforestry systems in Central America: I. A review of quantitative information on physiological and ecological processes. Agroforestry systems. 80(3): 341-359.

Virginio-Filho, E.d.M.; Haggar, J. 2005. ¿Cómo analizo y manejo los árboles en mi cafetal? Guía para evaluación con productores (as). Costa Rica, CATIE. 6.

Virginio-Filho, E.d.M.; Abarca-Monge, S. 2008. Cafetales para servicios ecosistémicos, con énfasis en el potencial de sumideros de carbono CATIE, Costa Rica, Turrialba.

White, J.W.; Hoogenboom, G.; Kimball, B.A.; Wall, G.W. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. Field Crops Research. 124(3): 357-368.

Zuluaga Sánchez, G.P.; Ruiz Arango, A.L.; Martínez Ceballos, E.C. 2013. Percepciones sobre el cambio climático y estrategias adaptativas de agricultores agroecológicos del municipio de Marinilla, Colombia. *In*. 2013. p.

2. ARTÍCULO 1. Simulaciones de la producción de café en parcelas de Nicaragua y Costa Rica

2.1 Resumen

Los modelos de cultivos buscan simular variables de interés en respuesta a variables y parámetros de entrada. Estos modelos se diferencian porque dependiendo de su objetivo así mismo puede ser utilizado como herramienta en toma de decisiones. CAF2007 es un modelo de procesos básicos que busca simular rendimientos bajo sistemas agroforestales de café. El modelo tiene en cuenta los mecanismos y procesos que operan en la parcela (árbol, café, suelo, sitio, ambiente). Sin embargo, existen incertidumbres en procesos que se pueden reducir con calibraciones.

Las calibraciones se realizan bajo estadística bayesiana y con el enfoque de las cadenas de Markov que generalmente usan modelos para calibrar parámetros. Sin embargo, muy pocos estudios han utilizado la calibración multisitio el cual puede bajar incertidumbres en los parámetros utilizando los datos medidos en todas las parcelas.

Se realizó la calibración por sitio (individual), por conglomerado y multisitio en 12 parcelas repartidas en tres zonas agroecológicas que son fría-húmeda: Llano Bonito, caliente-húmeda: Cartago y caliente-seca: Masatepe. Los resultados muestran que las simulaciones de un modelo calibrado son mejores que un modelo sin calibrar. Las calibraciones individuales para Turrialba presentan altos R^2 y bajos RMSE caso contrario de Masatepe que presenta altos RMSE y bajos R^2. Al igual que las parcelas en conjunto calibradas para Turrialba y Masatepe.

La calibración multisitio pierde poco RMSE en comparación con el conglomerado e individual. La validación de la parcela Mitch en la finca la Hammonia en Nicaragua con el modelo CAF2007 calibrado por multisitio presenta mejores ajustes que una simulación con parámetros sin calibrar, ya que se reduce la incertidumbre de los parámetros de los sitios calibrados.

Palabras claves:

Coffea arabica, CAF2007, Modelación, Validación

2.2 Introducción

El rubro de café en Centroamérica genera empleo a 25 millones de personas (ICO, 2010) a lo largo de la cadena de valor y se caracteriza por ser uno lo principales productos de exportación (Bertrand y Rapidel 1999). Es cultivado principalmente por pequeños productores siendo en muchas ocasiones el único sustento de la familia. La producción de café en Costa Rica presenta un descenso de producción del 20% con respecto al promedio entre el periodo de 1993 a 2012, mientras que Nicaragua ha aumentado un 40%. Estas producciones pueden ser afectadas por las características de los compartimientos ambientales (Federación Nacional de Cafeteros) como es el suelo, agua, humedad del aire, vientos, especie de sombra (Van Oijen *et al.* 2009), variedad (Bertrand y Rapidel 1999), manejo del cultivo y otros factores climáticos; así como también de las variaciones de los precios internacionales (Bertrand y Rapidel 1999).

Pocos modelos integran todas las variables ambientales, manejo de cultivo, sistemas agroforestales y variedad. Estos modelos se vuelven muy complejos y requieren de mucha información específica para la planta y el sitio.

CAF2007 es un modelo dinámico de simulación de la productividad y funciones ecosistémicos de plantaciones agroforestales de café, basado en la representación de sus procesos básicos a escala de parcela (Van Oijen et al. 2010). Representa la complejidad del funcionamiento del sistema (Rapidel *et al*. 2009), por medio de ecuaciones matemáticas de los procesos fisiológicos y ecológicos más importantes del crecimiento del cultivo. Este modelo es una herramienta útil para simular producciones, contenidos de N y C en la planta y el suelo, contenidos de agua, entre otras. El modelo usa 102 parámetros que son determinantes en las simulaciones y algunos específicos por sitio. Los parámetros pueden cambiar de un sitio a otro como por ejemplo los de suelo.

Este modelo ha sido elaborado en 2007, pero hasta ahora no ha sido calibrado ni probado en situaciones reales de producción. Para ello, requiere de información del sitio, de los procesos de la planta y cosecha, además de capacidad computacional para el proceso. La calibración da una mejor estimación de los parámetros en cada sitio y permite de forma interactiva ajustarse a las condiciones del sitio. Con ello, se pretende ajustar más a la realidad si se dispone de información parcial y ajustar parámetros que son difíciles de levantar.

En este estudio, se calibró el modelo en 12 sitios cafeteros distribuidos en 8 parcelas para Costa Rica y 4 parcelas para Nicaragua. Se usaron diferentes manejos de fertilización, podas, tipo de árbol, pleno sol y raleos. Se realizó la validación con la parcela de la finca cafetera la Hammonia en Nicaragua.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en la zona cafetera de dos países pertenecientes al área de estudio del proyecto "Sensibilidad y adaptación del café al cambio climático en Centroamérica: CafAdapt", en Nicaragua y Costa Rica.

Se realizó un análisis de conglomerados de 12 variables bioclimáticas que determinó 4 diferentes zonas en Nicaragua y Costa Rica como se muestra en la Figura 4. Las fincas experimentales se encuentran dentro de 3 zonas climáticas al igual que la finca cafetera de validación.

La zona climática uno se caracteriza por presentar un clima seco – frío con precipitación promedio anual de 1544 mm y temperatura media anual de 20°C. Esta zona está representada por Dipilto, los límites entre Estelí y Jinotega en Nicaragua. La zona dos es fría – húmeda con precipitación promedio anual de 2503 mm y temperatura media de 19°C al año. Su exponente es la zona de los Santos y Alajuela en Costa Rica; mientras que en Nicaragua se encuentra en los límites administrativos de Jinotega y Matagalpa. La zona tres se caracteriza por ser caliente-húmeda, mientras que la zonas cuatro es seca–caliente. La primera tiene 2886 mm promedio anual y temperatura media anual de 23°C representada en la zona de Cartago, en la parte sur de Puntarenas y en los límites de Puntarenas y San José, Costa Rica. La cuarta tiene precipitaciones de 1688 mm promedio anual y una temperatura media anual de 23°C expresada principalmente en Masatepe, una parte de Jinotega y Matagalpa.

Para la calibración, se usó 12 parcelas representadas en tres de los cuatro conglomerados definidos anteriormente. Estas parcelas están situadas:

- En la finca experimental del CATIE (Turrialba, 6 parcelas).
- En la finca cafetera de Llano Bonito de San Pablo de León Cortés, Tarrazú, Costa Rica.
- En la parcela PB95-9 de la finca Aquiares, Cártago - Costa Rica
- Ensayo de café de la zona baja seca en Masatepe, Nicaragua.

Mientras que para la validación se usó datos de fincas localizadas en Nicaragua (Figura 4).

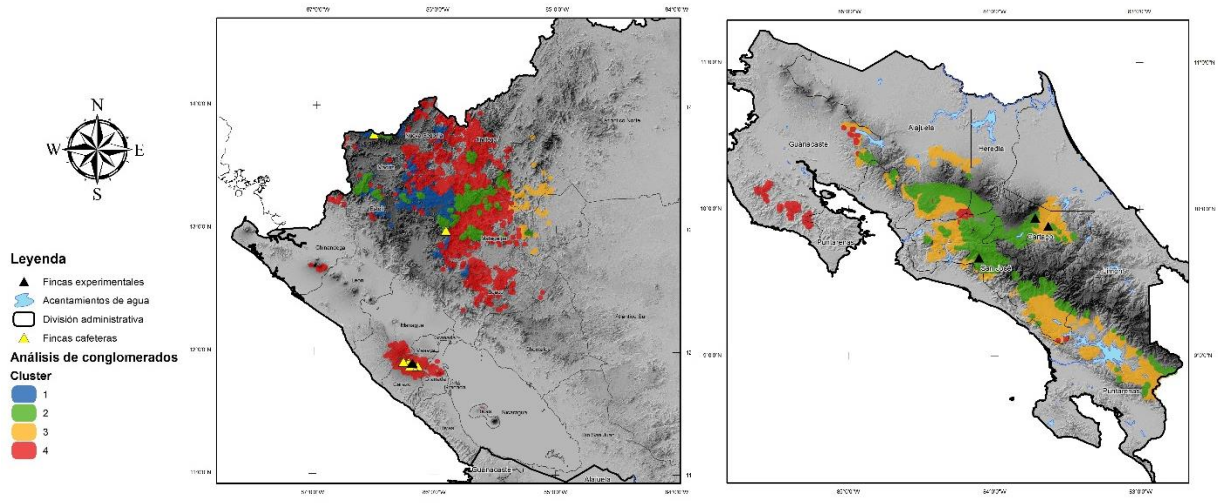

Figura 4. Análisis de conglomerados y fincas experimentales y cafeteras de estudio en Nicaragua y Costa Rica

2.3.2 Descripción de las fincas de estudio

Finca experimental del CATIE - Cartago, Costa Rica

El ensayo de sistemas agroforestales con café se encuentra ubicado en el cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica. Se instaló hace 12 años presentando un área total de 9.2 ha, divido en 20 tratamientos de sistemas de producción con tres repeticiones. Presenta una altitud de 600 msnm, con las condiciones climáticas siguientes: (medias 2000-2012) precipitación 3038mm/año, temperatura promedio anual de 23°C, 90% de humedad relativa y radiación solar de 15.76MJ m^2 $día^{-1}$.

Antes de instalar el ensayo, el terreno se dedicaba al cultivo de caña y pasto; por lo tanto, tenía un historial de degradación del suelo. La capa más fértil se encuentra entre 10 – 30 cm de profundidad, posee textura franco a franco-arcilloso y tiene limitaciones de drenaje inicial y presenta aluviales mixtos (utisoles e inceptsoles) (Virginio-Filho *et al.* 2012).

Para la calibración del modelo CAF2007, se escogió 6 parcelas: alto convencional y medio convencional con sombra de amarillón (*Terminalia amazonia)*, poró (*Erythrina poeppigiana)* y a plena exposición solar con la variedad Caturra (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos seleccionados del ensayo de sistemas agroforestales con café de CATIE, Turrialba

Programa anual		Fertilización al suelo	Sombra	Raleos	Poda café
Poró	AC	280kg N ha^{-1}	Poda drástica	50%	Selectiva
	MC	150 kg N ha^{-1}	Regulada	50%	Selectiva
Terminalia	AC	280kg N ha^{-1}	Regulada	80%	Selectiva
	MC	150 kg N ha^{-1}	Regulada	80%	Selectiva
Pleno Sol	AC	280kg N ha^{-1}	Regulada	-	Selectiva
	MC	150 kg N ha^{-1}	Regulada	-	Selectiva

AC: Alto convencional MC: Medio convencional

Ensayo de café de la zona baja seca en Masatepe, Nicaragua

El ensayo de sistemas agroforestales en zona baja seca con café se encuentra ubicado en el Centro de Capacitación y Servicios Regionales del Café del Pacífico Sur – UNICAFE con dos repeticiones y una tercera repetición fue establecida en el año 2001 en el Centro Experimental Campos Azules (CECA) del INTA, en el Municipio de Masatepe, departamento de Masaya, Nicaragua (Moraga *et al.* 2011). Se instaló hace 12 años presentando un área entre 500m^2 a 850m^2 en cada tratamiento.

Presenta una altitud de 453 msnm, con una precipitación promedio anual de 1400 mm, temperatura promedio anual de 24.6°C y una humedad relativa entre 70-80%. Los suelos son moderadamente profundos, bien drenados, son suelos franco a franco-arcillosos, son suelos Humic Durustand con topografía plana, alto contenido de materia orgánica y acidez de 5.9 – 6.7 de pH (Blanco *et al.* 2003).

Se escogió 4 parcelas de pacas con un manejo medio convencional y alto convencional. Dos parcelas bajo sombra predominante de *Inga edulis* y dos a pleno sol (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tratamientos seleccionados del ensayo de sistemas agroforestales con café en Masatepe, Nicaragua.

Programa anual		Fertilización al suelo	Sombra	Raleos	Poda café
Pred. Inga edulis	AC	144 kg N ha^{-1}	Regulada	61%	Selectiva
	MC	73 kg N ha^{-1}	Regulada	66%	Selectiva
Pleno sol	AC	144 kg N ha^{-1}	-	-	Selectiva
	MC	73 kg N ha^{-1}	-	-	Selectiva

AC: Alto convencional MC: Medio convencional Pred.: Predomina

Llano Bonito - San José, Costa Rica

La finca cafetera se encuentra ubicada en la región de los Santos a 1620 m.s.n.m. cerca de la cordillera Central de Costa Rica. Se caracteriza por una precipitación promedio anual de 2500 mm, temperaturas mínima promedia de 14°C y máximas de 24°C.

La zona presenta pendientes pronunciadas y café bajo sistemas agroforestales. La finca seleccionada tiene dominancia de sombra de poró y muy poca sombra de musáceas. Se recopiló la información del estudio hecho por Meylan (2012). El manejo se resume en el cuadro 5.

Cuadro 5. Finca cafetera en Llano Bonito, Costa Rica.

Programa anual		Fertilización al suelo	Sombra	Raleos	Poda café
Pred. Poró	AC	300kg N ha^{-1}	Regulada (50%)	20%	Selectiva

AC: Alto Convencional Pred.: Predomina

Aquiares-Cartago, Costa Rica

La finca de Aquiares es la más plantación de café más grande del país con una extensión total de 917ha de las cuales 675 ha están cultivadas con café. Se encuentra ubicada a 10 km de Turrialba con una elevación promedio de 1100 m.s.n.m. y entre dos ríos Turrialba y Aquiares. Se caracteriza por una precipitación promedio anual de 3027 mm y un promedio de 226 días de lluvia en el año. Presenta una temperatura promedia anual de 20°C (máxima de 23°C y mínima de 16°C).

Se seleccionó la parcela PB95-9 cultivada con un 98% de la variedad caturra y con sombra de poró a libre crecimiento (sin podas ni raleos). Los detalles del manejo general se especifican en el cuadro 6, estos varían cada año como es la fertilización.

Los datos para la calibración de la finca se obtuvieron del doctorado de Fabien Charbonnier (Charbonnier 2013) y de pasantes que ejecutaron sus estudios en esta parcela.

Cuadro 6. Finca cafetera Aquiares, Costa Rica.

Programa anual		Fertilización al suelo	Sombra	Raleos	Poda café
Poró	AC	260 kg N ha^{-1}	No regulada	Sin	Selectiva

2.3.3 Procedimiento metodológico

En la simulación del cultivo de café, se usó el modelo CAF2007. El modelo trabaja con 104 parámetros de los cuales 70 son calibrados. Se obtuvo información de datos de iniciación del modelo y se tuvo en cuenta el modelo modificado para su calibración y validación. Se recopiló información de los parámetros levantados de café en los sitios de estudio, revisión de literatura de tesis, proyectos y estudios en las parcelas, levantamiento de datos y entrevistas a productores.

2.3.3.1 Datos de iniciación del modelo

Para correr el modelo, se debe especificar los valores de iniciación que se resumen en clima, parámetros de árbol, café y suelo, además del manejo en el sitio:

- *Clima:* Seis datos de variables climáticas diarias: la temperatura mínima y máxima (°C), la velocidad del viento (m/s), radiación global (MJ m^{-2} $día^{-1}$), presión de vapor (kPa) y precipitación (mm).

- *Modelo de inicialización:* Para iniciar el modelo, se requiere de cuatro variables para el árbol de sombra, cuatro para el café y siete para el suelo que se resumen en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Variables iniciales requeridas para CAF2007.

	Parámetros	**Identificador**	**Unidad**	**Dato/defecto**
Árbol	Biomasa inicial de C en ramas	CB0T	kg C m^{-2}	0.10
	Biomasa inicial de C en hojas	CL0T	kg C m^{-2}	0.05
	Biomasa inicial de C en raíces	CR0T	kg C m^{-2}	0.2
	Biomasa inicial de C en tallos	CS0T	kg C m^{-2-}	0.10
Café	Biomasa inicial en hojas	CL0	kg C m^{-2}	0.05
	Biomasa inicial en frutos	CP0	kg C m^{-2}	0.00
	Biomasa inicial en raíces	CR0	kg C m^{-2}	0.05
	Biomasa inicial en tallos y ramas	CW0	kg C m^{-2}	0.05
Suelo	Cantidad inicial de hojarasca	CLITT0	kg C m^{-2}	0.33
	Concentración inicial de C en la materia orgánica	CSOM0	kg C m^{-2}	11.00
	Fracción inicial de la materia orgánica del suelo (inestable)	FCSOMF0	-	0.64
	Relación C/N inicial en la hojarasca	CNLITT0	kg C kg^{-1} N	17.00
	Relación C/N inicial en la materia orgánica inestable	CNSOMF0	kg C kg^{-1} N	12.00
	Valores iniciales NMIN	NMIN0	kg N m^{-2}	0.001
	Relación C/N inicial en la materia orgánica estable.	CNSOMS0	kg C kg^{-1} N	11.00

- *Manejo.* El modelo requiere de tres parámetros para manejo de café (primer día de la poda, intervalo de poda y fracción de biomasa podada), seis parámetros para el manejo del árbol de sombra (podas, intervalo de podas, fracción de biomasa podada, datos de raleos, fracción de biomasa raleada y la densidad inicial de árboles) y dos parámetros para manejo de fertilidad de suelos (fecha de aplicación del fertilizante edáfico y su ración).

Para las fincas experimentales y cafeteras de estudio, se recopilaron los datos de iniciación del modelo. La información en cada parcela presenta fechas y ración de fertilización, podas de café, podas del árbol de sombra, raleos, variedad, densidad de siembra; como se muestra en el cuadro 8, 9 y 10. Las podas y el raleo en café y árbol de sombra varían anualmente en fracción y fecha de labor realizada.

Cuadro 8. Parámetros de iniciación del modelo CAF2007 en Turrialba, Costa Rica.

Parámetro	Unidades	Fecha (día)	Parcelas					
			T-AC	T-MC	P-AC	P-MC	PS-AC	PS-MC
Fertilización	kg N ha^{-1} $año^{-1}$	135	90	45	90	45	90	45
		289	90	45	90	45	90	45
		350	100	60	100	60	100	60
Poda café	%	-	30	30	28	28	30	30
Poda árbol	%	-	40	10	90	60	-	-
Raleo árbol	%	-	51	55	48	51	-	-
Densidad árboles	# m^{-2}	inicio	0.07	0.07	0.07	0.07	-	-

T: *Terminalia amazonia* P: *Erythrina poepiggiana* PS: Pleno sol AC: Alto convencional MC: Medio convencional

Cuadro 9. Parámetros de iniciación del modelo CAF2007 en Masatepe, Nicaragua.

Parámetro	Unidades	Fecha(día)	Parcelas			
			IL-AC	IL-MC	PS-AC	PS-MC
Fertilización	kg N ha^{-1} $año^{-1}$	185	37	19	37	45
		256	34	17	34	45
		276	74	37	74	60
Poda café	%	-	27	27	27	27
Poda árbol	%	-	35	35	-	-
Raleo árbol	%	-	62	65	-	-
Densidad árboles	# m^{-2}	inicio	0.035	0.035	-	-

IL: Inga laurina PS: Pleno sol AC: Alto convencional MC: Medio convencional

Cuadro 10. Parámetros de iniciación del modelo CAF2007 en Aquiares y Llano Bonito, Costa Rica.

Parámetro	Unidades	Fecha(día)	Parcelas	
			Aquiares	Llano Bonito
Fertilización	kg N ha^{-1} $año^{-1}$	185	112	100
		256	74	100
		276	74	100
Poda café	%	-	20	20
Poda árbol	%	-	-	50
Raleo árbol	%	-	-	20
Densidad árboles	# m^{-2}	inicio	0.000738	0.025

2.3.3.2 Calibración

Los parámetros de entrada de CAF2007 determinan en gran medida sus salidas. En ciertos casos, hay acceso a mediciones de estos parámetros, en otros casos a estimaciones. En todos los casos, los valores no son exactos, sino que presentan incertidumbres que deben ser cuantificadas (Van Oijen 2005).

Van Oijen (2005) propuso cuantificar estas incertidumbres de los valores de parámetros por medio de la distribución de probabilidad *a priori*, usando los datos de la salida del modelo para calibrar el modelo.

La calibración se muestra como una herramienta novedosa para reducir la incertidumbre y encontrar valores de parámetros que se ajusten a la realidad.

Para llevar a cabo la calibración, se tuvo en cuenta la selección de parámetros, datos de campo utilizados en la calibración, calibración bayesiana por sitio y multisitio y la evaluación de la calibración.

a. Selección de parámetros

- Parámetros cuyo valor se pudo medir o sean conocidos directamente. Por ejemplo, los relativos a la geografía, o que fueron bien documentados en la literatura o en el campo de experimentos científicos.
- No se tomaron parámetros que no tienen suficiente impacto en los resultados del modelo de acuerdo con un análisis de sensibilidad hecho por Remal (2008), y por lo tanto, no necesitan ser calibrados.
- Parámetros con un impacto significativo sobre los resultados del modelo y no están documentados, y por lo tanto, necesitaron ser calibrados.

b. Datos de campo utilizados en la calibración

Se utilizaron 19 variables para calibrar el modelo CAF2007, de las cuales el 100% de los sitios cuenta con la productividad del café y el carbono promedio en el suelo. El contenido de carbono en la parte aérea de la planta de café también dispone de una presencia importante del 75% y en menor proporción está el índice de área foliar del café y del árbol de sombra así como los contenidos de carbono en el tronco y hoja del café.

El número de variables cambia por sitio, ya que la información fue levantada por diferentes estudiantes de maestría, doctorados, pasantes y personas que intervienen en proyectos. Las variables para la calibración se resumen en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Variables de salida para la calibración del modelo CAF2007.
La frecuencia es el porcentaje total de presencia de la variable por cada parcela.

Variable	Identificador	Unidad	Frecuencia
Productividad del café (separado entre sol y sombra en Llano Bonito)	harvDMav_year	t MS ha-1 y-1	100%
Altura árbol	h	m	33%
Área de sombra	SA	$m^2\ m^{-2}$	50%
Promedio de C en el Suelo	Csoilave	t C ha-1	92%
C en la parte área del árbol de sombra	CTT	kg C m^{-2}	50%
C en la parte aérea de la planta de café	CT	kg C m^{-2}	50%
Promedio de N en el suelo	Nsoilave	t N ha-1	75%
Área de copa del árbol	CAtree	m^2	17%
Índice promedio de área foliar del café	LAIave	$m^2\ m^{-2}$	17%
Índice de área foliar en pleno sol	LAI(1)	$m^2\ m^{-2}$	8%
Índice de área foliar en la sombra	LAI(2)	$m^2\ m^{-2}$	8%
Índice promedio de área foliar del árbol de sombra	LAIT	$m^2\ m^{-2}$	17%
Contenido de agua en el suelo	WC_F	$m^3H_2Om^{-3}\ y^{-1}$	25%
Contenido de C en el tronco a pleno sol	CW(1)	kg C m^{-2}	8%
Contenido de C en el tronco en la sombra	CW(2)	kg C m^{-2}	8%
Contenido de C en las hojas de café a pleno sol	CL(1)	kg C m^{-2}	8%
Contenido de C en las hojas de café en la sombra	CL(2)	kg C m^{-2}	8%

c. Calibración bayesiana

Para la calibración bayesiana, se requiere de un número largo de simulaciones. Se utiliza la cadena de Markov para calcular las distribuciones *a posteriori* de los parámetros, y se camina por un espacio multidimensional de parámetros, explorando y corriendo el modelo en cada punto del camino. Para escoger el valor adecuado, primero se encuentra el valor candidato por cada parámetro. El modelo se corre N parcelas (uno o varios sitios) y la verosimilitud es determinada. Se comienza la cadena de Markov con la mitad de la distribución *a priori* de cada parámetro.

La calibración parte de valores de parámetros elegidos al azar dentro de un intervalo de confianza de 95% de la distribución previa. A partir de esto nuevos puntos candidatos, son determinados a medida que se mueve en el espacio multi-dimensional (Reinds *et al.* 2008). Para remover los efectos de elegir el punto de partida de la cadena, se descarta un 10% de las iteraciones al inicio de las simulaciones.

La aceptación de un nuevo punto resulta del producto de la probabilidad *a priori* y la verosimilitud que exceda el punto actual. Si la relación del nuevo y el actual producto *a priori* y la verosimilitud están entre 0 y 1 puede ser aceptado, pero con probabilidad que es igual a la relación inicial (Reinds *et al.* 2008).

Para correr la calibración bayesiana, se disponen de los *scripts* realizados por Marcel Van Oijen y que se ejecutan bajo el lenguaje de programación de R.

El modelo fue escrito inicialmente en Matlab y fue reescrito en Fortran. En donde se tiene 11 archivos distribuidos en compartimientos de café, suelo, sombra, árbol, manejo, procesos que pasan encima y debajo del suelo y un archivo principal de donde se llaman todos los demás compartimientos. CAF2007 se inicia bajo *scripts* de R, al igual que la calibración.

Para la calibración, se utilizan: (a) un archivo general en donde declara las condiciones del sitio, se realiza la distribución prior de los parámetros y la primera interacción con la probabilidad o umbral de incertidumbre de cada variable.

(b) Un archivo inicial BC por sitio o multisitio. Se especifica los archivos de inicio del modelo para la/cada parcela. Llama los archivos declarados para manejo, clima, parámetros de defecto e inicio del cultivo. En el archivo inicial BC, se declara un archivo que contiene los datos de salida del modelo observados. La función de verosimilitud, la cantidad de iteraciones (nChain) y el factor propuesto que modifica la longitud de cada paso sugerido por Gelman.

(c) El tercer archivo declara la rutina de la cadena de Markov. Verifica si la iteración es un valor aceptado y continúa con la siguiente iteración. Esto quiere decir que vuelve a correr el modelo el número de veces que se especifica en el nChain.

d. Evaluación de calibración

Para estimar la bondad de ajuste del modelo en comparación con el modelo sin calibrar, se utilizó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para diferentes variables de salida. Se tuvo en cuenta en cada variable el número de mediciones observadas versus las simuladas. El RMSE se define como la raíz cuadrática de la diferencia entre los valores observados (medidos) y los valores simulados al cuadrado, divido entre el número total de valores. Entre más cercano esté el valor a 0, mejor se ajusta el modelo a los datos medidos.

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{obs,i}-X_{model,i})^2}{n}}$$

Donde:

n = número de observaciones de la muestra

$X_{obs,i}$= son los valores observados para el "i"-ésimo año.

$X_{model,i}$ = Son los valores modelados para el "i"-ésimo año.

Este valor de RMSE tiene una validez limitada, en el sentido que este indicador supone que el dato medido es exacto, lo que es contradictorio con el principio de la calibración bayesiana, donde todos los valores, incluso los datos medidos están asociados a una distribución de probabilidades.

2.3.3.3 Validación

En la validación, se realizó un análisis de conglomerados para identificar zonas con similaridad climática. Fue necesario recopilar información de datos históricos para correr el modelo como se muestra en el punto 2.3.3.1 sección: datos de iniciación del modelo (clima, modelo de iniciación, manejo, rendimiento de café y otros) con el fin de comparar y analizar los resultados del modelo CAF2007 por medio de análisis de RMSE.

2.4 Resultados

2.4.1 CAF2007 modificado

El modelo fue modificado en dos procesos con respecto al modelo publicado: el inicio de la floración y se incluyeron dos nuevos parámetros en la fuerza de sumidero de los granos de café.

Inicio de floración

La activación de la floración fue modelada como el primer día del año que excede un cierto umbral de lluvia (Van Oijen 2010): la planta pasa de un estado vegetativo y un estado fructífero después de una lluvia diaria mayor al umbral (por defecto en 10mm). Si no se cumple ninguna de las anteriores condiciones, no hay una activación de la floración.

La floración inducida por una precipitación mayor a 10 mm al inicio del año no es tan confiable; ya que lugares como Turrialba presentan pequeñas lluvias al inicio del año. En la versión original del modelo, estas lluvias provocan la floración, mientras que la floración real varía entre los primeros tres meses (Figura 5). Es así que se modificó ligeramente el modelo reemplazando el parámetro RAINHI con un nuevo parámetro RAINdoyHI.

Este parámetro modifica la floración para que inicie el primer día del año donde el producto de la cantidad de lluvia diaria y el día Julián sea mayor a 1000 (valor del parámetro RAINdoHI).

RAINdoyHI requiere de 100 días (3.3 meses) con una precipitación diaria de 10 mm para que induzca la floración, y si es el caso contrario se necesitaría 100 mm en 10 días para la floración. Precipitación que puede ocurrir en Turrialba (Figura 5), pero poco probable en Masatepe ya que los primeros meses del año son secos.

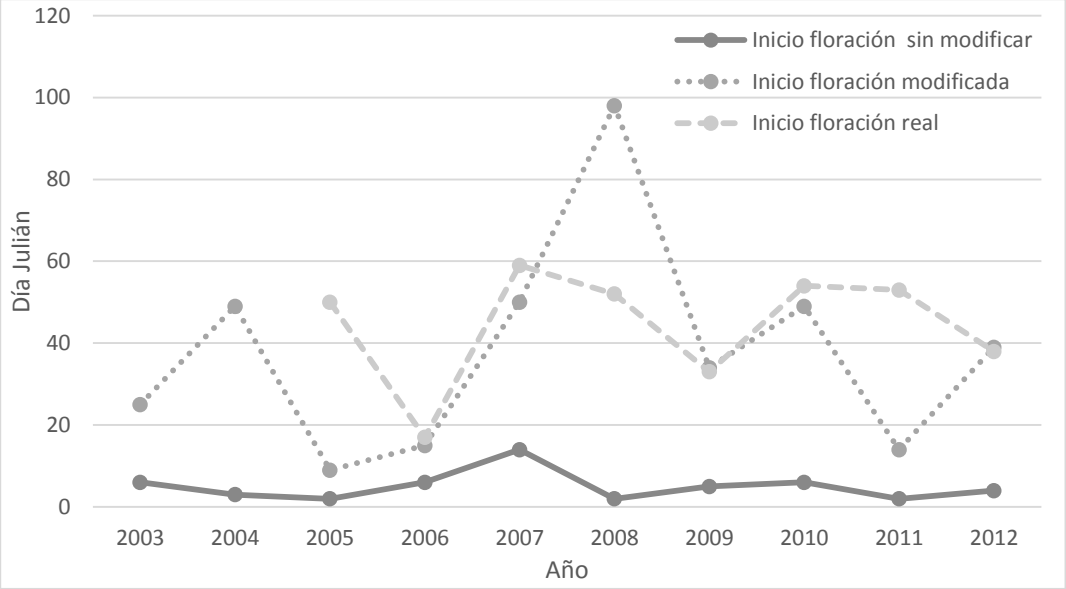

Figura 5. Inicio de floración simulada con el modelo modificado, sin modificar y floración real en Turrialba, Costa Rica.

Se compararon los dos modelos sin modificar y modificado bajo la raíz del error cuadrático medio (Cuadro 12). El modelo que mejor se ajusta es el que presenta el valor de 26.02 correspondiente al inicio de la floración modificada. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el modelo solo simula una floración y en Turrialba pueden expresarse hasta 5 floraciones en el año, siendo dos floraciones las determinantes en la mayoría de la cosecha.

Cuadro 12. RMSE de simulaciones de floraciones modificadas y sin modificar.

Modelo	RMSE
Inicio de floración sin modificar	41.52
Inicio de floración modificado	26.02

El modelo puede simular muy bien la floración en lugares donde el clima es bien definido. Masatepe es un lugar donde están bien diferenciadas las épocas de lluvia y la época de sequía, el modelo original se ajusta muy bien a las floraciones reales.

Fuerza de sumidero de los granos de café

La planta de café es una especie primitiva y de sombra que no genera grandes cantidades de granos para reproducirse sino que utiliza su mayor energía en producir follaje por la competencia de luz (Segura 1990). El café no evolucionó y con los sistemas actuales de pleno sol y sombra moderada hay una explotación para que produzca granos ocasionando un desequilibrio energético que hoy en día se conoce comúnmente como bienalidad de la producción.

El modelo CAF2007 original no tiene en cuenta las variaciones bienales de producción y la baja producción en la primera cosecha de café. Para incluir estas condiciones, se adicionaron dos nuevos parámetros: FSINKPMAX0 y KSINKPMAX. El primero permite reducir

la fuerza de sumidero y el rendimiento de café en el primer año de producción y el segundo incrementa la variación bienal en el rendimiento de café como se ve en la figura 6.

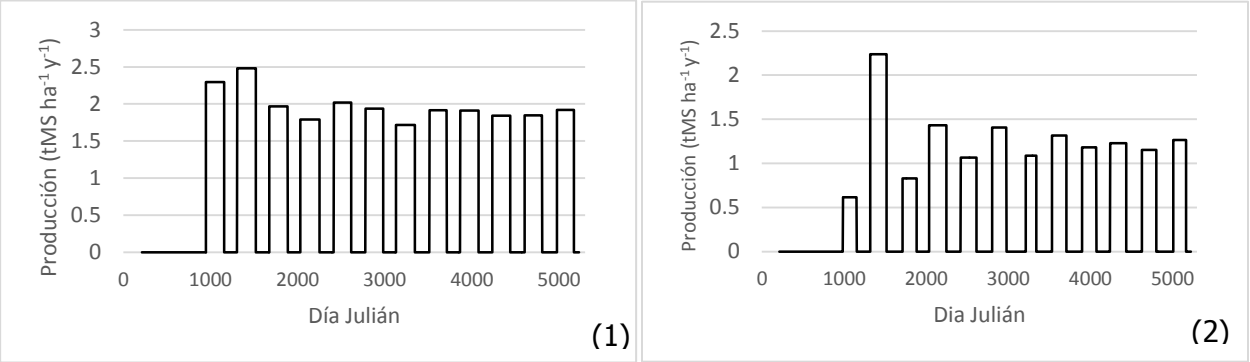

Figura 6. Variación bienal de la producción de café simulada por el modelo CAF2007. (1) Modelo original; (2) modelo modificado.

2.4.2 Priorización de parámetros para calibración

Se escogieron 70 parámetros para calibrar el modelo que varían entre 67 a 70 dependiendo de cada sitio. Se seleccionaron 30 parámetros del árbol, 13-16 de suelo y 24 de café.

Los sitios con más parámetros son los que son generalmente carecen de un análisis de suelo inicial y los de menor cantidad son los que incluyen la fracción inicial de MO en el suelo. Los parámetros seleccionados integran los determinados por el análisis de sensibilidad y se incluyeron nuevos parámetros que influyen directamente en los procesos del modelo como se muestra en el Anexo 1.

En la calibración multisitio, los parámetros de suelo son específicos por cada sitio; los parámetros de café se mantienen igual para todas las parcelas y los parámetros de árbol cambian dependiendo de la especie de sombra.

2.4.4 Calibración de CAF2007

En una primera etapa, la calibración se hizo por cada sitio con una especie de árbol, posteriormente se unieron los sitios por conglomerado climático (conglomerado-Turrialba&Masatepe) y finalmente se hizo la calibración por el conjunto de todos los sitios (multisitio). Por cada sección, se hicieron 100 000 iteraciones con una desviación estándar mínima de 3% y una máxima tomada de cada variable medida.

La calibración bayesiana ha sido implementada en diferentes modelos para un sitio específico. La calibración multisitio es un método relativamente nuevo usado para calibrar modelos como el VSD que simula la solución química del suelo y las piscinas de nitrógeno en ecosistemas naturales y seminaturales (Reinds *et al.* 2008), el modelo forestal BASFOR (Van Oijen *et al.* 2005) y el modelo de café CAF2007. La descripción del proceso lo explica Van Oijen *et al.* (2005) en su artículo y que se usó como parte de la metodología, ya que se pueden calibrar los parámetros que influyen en los procesos del modelo a partir de datos medidos en campo.

Calibración por sitio.

Para la mayoría de los sitios, se tiene datos medidos de producción entre 10-11 años a excepción de Llano Bonito (2 años solamente). Las producciones medidas máximas de materia seca del grano de café oro (t MS ha^{-1} $año^{-1}$) en Turrialba son de 5.74, Aquiares 4 y en Masatepe 5. Las mínimas son 0.18, 1.2 y 0.14, respectivamente. El modelo calibrado simula producciones máximas en Turrialba de 4.27, Aquiares 3.9 y Masatepe 2.43, mientras que las mínimas son 0.4, 0.46 y 0.0002, respectivamente. La varianza de las cosechas entre los datos medidos y calibrados son 1.5 a 0.00003 en Turrialba, 2.5 a 0.006 en Aquiares y 2.5 a 0.002 en Masatepe.

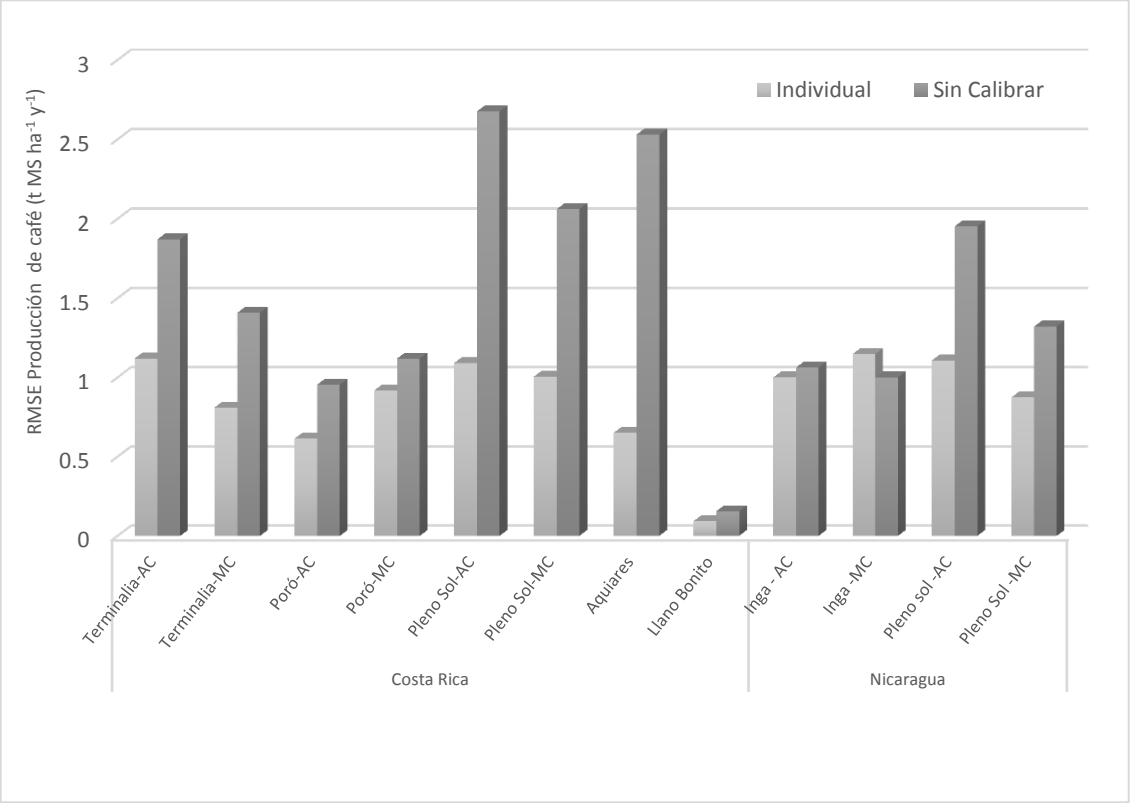

Figura 7. RMSE para la producción de café (t MS ha-1 y-1) de las 12 parcelas de estudio.
Individual se refiere a la calibración por sitio y sin calibrar es la simulación con los datos por defecto.

Los sitios calibrados individualmente y los sitios sin calibrar, como se muestra en la figura 7, indican que el RMSE para la producción de café (t MS ha-1 y-1) mejora en la mayoría de los sitios calibrados variando entre un 0.06 a 1.88 con excepción de *Inga edulis* con tratamiento medio convencional que aumenta en 0.14. La mejor calibración de producción de café la expresa Llano Bonito, esto se debe a la baja cantidad de datos medidos de producción. *Erythrina poepiggiana* en manejo alto convencional con un RMSE 0.6 y un porcentaje de diferencia entre el modelo calibrado y sin calibrar (40%) se considera como una de las parcelas que mejor simula el modelo. *Terminalia amazonia* con manejo medio convencional también expresa buen ajuste y se puede observar en la Figura 8.

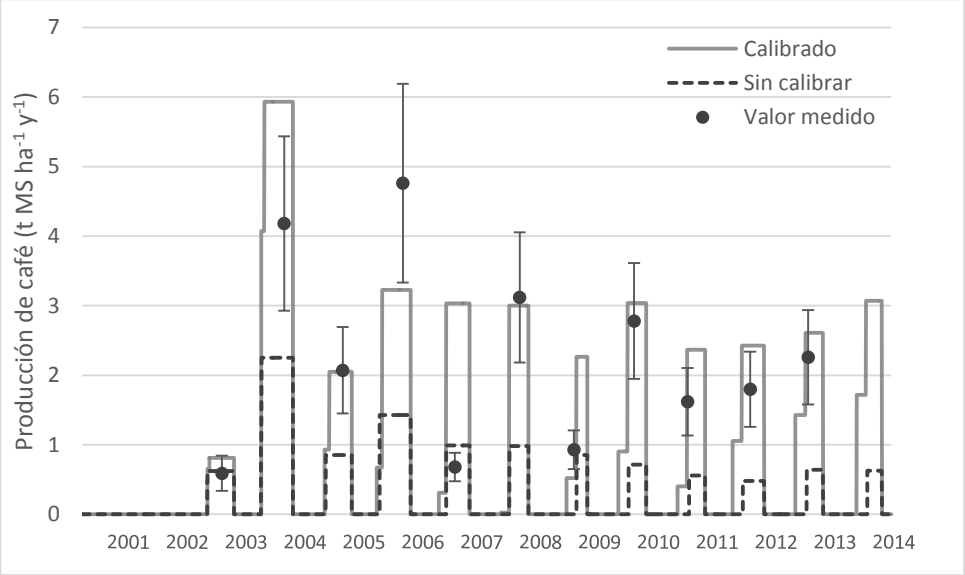

Figura 8. Calibración de la producción de café (t MS ha-1 y-1) en la parcela *Terminalia amazonia* medio convencional.

La figura 9 muestra la producción de café simulado contra la producción medida y su respectivo coeficiente de determinación (R^2) para cada una de las parcelas calibradas. El R^2 mide la proporción de la variabilidad total de la variable dependiente (producción simulada) respecto a su media que es explicada por el modelo de regresión. El coeficiente de determinación define la calidad del modelo para replicar los resultados que son los valores cercanos a 1.

Las parcelas de Turrialba tienen valores superiores a 0.52 siendo los sitios calibrados que mejor se ajustan. Llano Bonito tiene el mejor R^2, pero como se explicó anteriormente cuenta con muy pocos datos. Aquiares tiene un valor de 0.37 requiriendo de ajustes en el modelo para mejorar su R^2. Masatepe cuenta con los valores del coeficiente de determinación más bajos, los valores de las parcelas de *Inga edulis* alto y medio convencional y el valor de pleno sol medio y alto convencional no superan el 0.32. Estas bajas simulaciones pueden deberse a varios factores que se retomarán en la discusión.

Tal como se determinó en la RMSE, la parcela de *Terminalia amazonia* – MC con el modelo calibrado presenta un buen ajuste y el coeficiente de determinación lo reitera con un valor de 0.87, siendo el más alto de todas las calibraciones (Figura 9 a y b).

Los datos simulados de la parcela *Inga edulis* – alto convencional no se ajustan muy bien ya que las simulaciones al inicio de cosecha (2003 y 2004) y al final de la cosecha (2011 y 2012) no se ajustan correctamente con la bienalidad que tiene la planta de café. Al inicio la sobrestima y al final la subestima (Figura 9 g).

En la parcela *Inga edulis* – medio convencional, la mayoría de los valores son subestimados (Figura 9 h). Mientras que en las parcelas de pleno sol – alto convencional y medio convencional las cosechas de 2004-2005 y 2013-2014, los valores se sobrestiman y en 2007-2008 el valor se subestima. Por tal razón, el R^2 disminuye en gran proporción mientras que en las otras 7 cosechas el valor de diferencia nunca supera 0.8 t MS ha-1 y-1. El modelo mejora con un R^2 de 0.7 sin las tres mediciones anteriormente citadas (Figura 9 i y j).

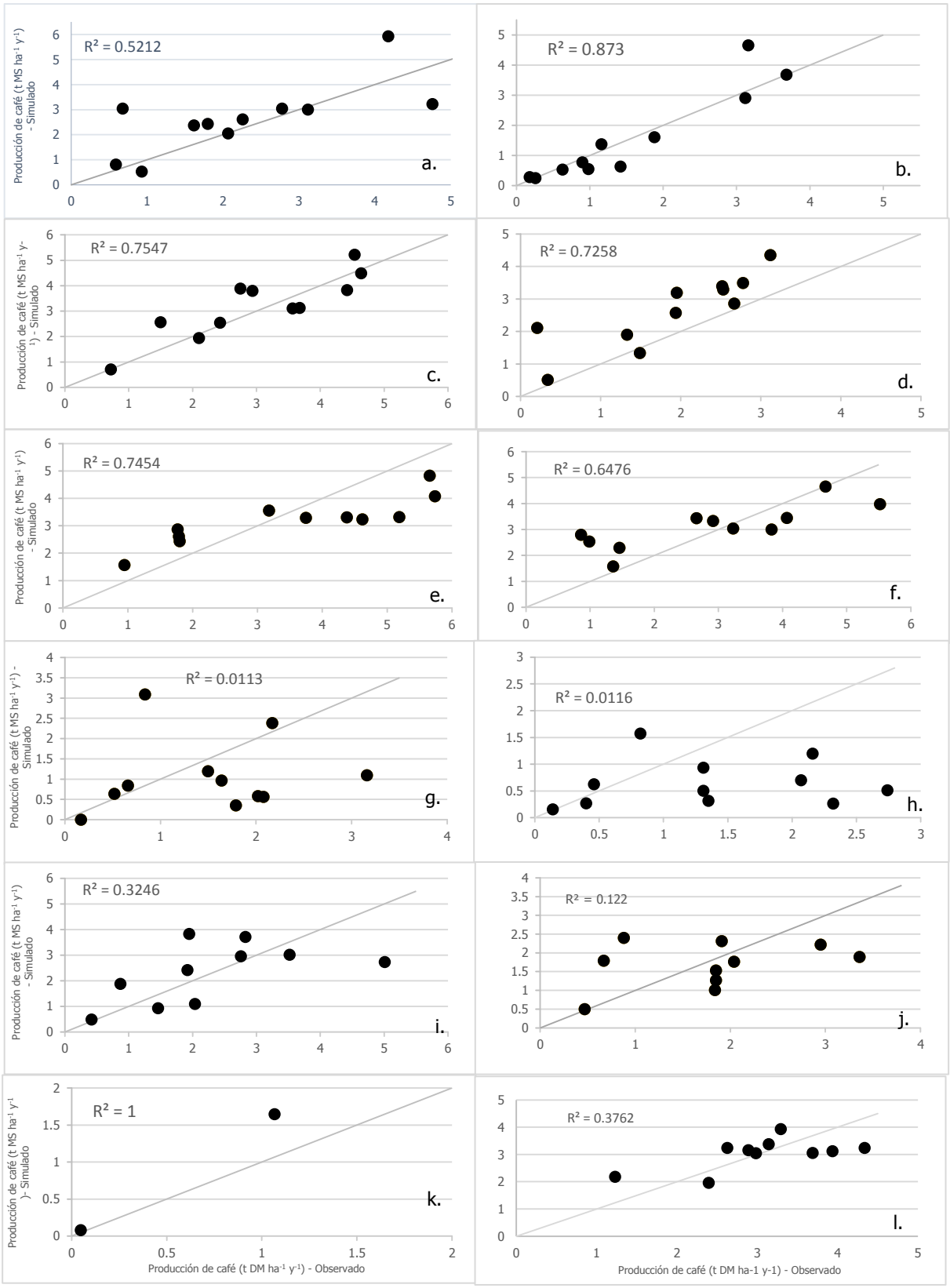

Figura 9. Coeficiente de determinación para la producción de café (t MS ha-1 y-1) en cada parcela calibrada. A. *Terminalia amazonia* – AC; B. *Terminalia amazonia* – MC; C. *Erythrina poepiggiana* – AC; D. *Erythrina poepiggiana* – MC*;* E. Pleno sol – AC; F. Pleno sol – MC; G. *Inga edulis* – AC; H. *Inga edulis* – MC; I. Pleno sol – AC; J. pleno sol – MC; K. Llano Bonito; L. Aquiares. La recta indica la relación 1:1.

El modelo sobrestima la cosecha del 2005-2006 en Aquiares. Este valor afecta el coeficiente de determinación pasando de un 0.7 a un 0.4. Los demás valores se ajustan bien a los datos medidos como se muestra en la Figura 9 l.

El nitrógeno es indispensable para el desarrollo de la planta de café en la producción de follaje favoreciendo la actividad fotosintética y posibilita una mayor fructificación y rendimiento del café (Fischerworring y Robkamp 2001). En el modelo la estimación del nitrógeno, está dada por la relación C/N y está directamente relacionada con el contenido de materia orgánica del suelo y los valores pueden variar ente 8 y 14 (Fassbender y Bornemisza 1987).

El contenido promedio de nitrógeno en el suelo (kg N m^{-2}) para suelos de origen volcánico es de 3.44 y los valores varían entre 1.72 a 6.02 dependiendo del sitio (Fassbender y Bornemisza 1987). Ocho sitios cuentan con valores medidos para N en el suelo en este estudio; 4 en Costa Rica y 4 en Nicaragua. Las parcelas de Costa Rica son suelos de origen volcánico mientras que en Masatepe son suelos Humic Durustand.

Los valores medidos presentan contenidos de nitrógeno promedio de 5.31 a 8.82 kg N m^{-2} en Turrialba mientras que Masatepe tiene contenidos más altos de nitrógeno en el suelo comprendidos entre 8.53 a 12.6 kg N m^{-2}.

El modelo calibrado y sin calibrar tienen la misma tendencia de contenido de N en el suelo con valores bajos en Turrialba y valores altos en Masatepe. El modelo calibrado presenta valores de RMSE que varía entre 0.59 a 2.75 donde el primero es la parcela de *Terminalia amazonia* – MC y el segundo es *Inga edulis*- con manejo alto convencional. Aquiares presenta valores superiores debido a la falta de información inicial de contenido de N en el suelo.

Los valores simulados versus los valores del modelo sin calibrar presentan diferencias de RMSE. En donde el modelo calibrado se comporta mejor para Turrialba mientras que en Masatepe presenta muy pocas diferencias de RMSE con excepción de *Inga edulis* – AC.

En la Figura 10 a y b muestra el contenido de nitrógeno en *Erythrina poepiggiana* – MC y *Terminalia amazóniza* – MC donde se puede contrastar las simulaciones del modelo calibrado y sin calibrar.

El carbono en el suelo es una de los mayores reservorios existentes. El carbono orgánico es importante, ya que afecta la agregación del suelo, las reacciones químicas que ocurren en el suelo, la porosidad e infiltración del agua, aunque estos dos últimos también dependen de otros factores (Martínez *et al.* 2008). Los valores de carbono en el suelo cambian dependiendo del contenido de MO, lixiviación, erosión y la pérdida por CO^2 (Martínez *et al.* 2008).

Los valores medidos en 11 parcelas de estudio muestran que Turrialba presenta valores bajos de carbono (C) entre 78. 6 y 92.95 kg C m-2 en comparación con Masatepe que tiene entre 115.26 a 170.03 kg C m-2. Aquiares presenta el valor más alto de las parcelas con 192 kg C m-2 para 2011.

El modelo sin calibrar para Turrialba tiene valores de RMSE muy altos entre 14 a 33 mientras que en Masatepe el modelo sin calibrar presenta RMSE más bajos con valores entre

2.20 a 19.6, mientras que Aquiares tiene un RMSE de 0.41 y es la mejor parcela que se ajusta.

En el modelo calibrado para Turrialba, los valores de RMSE son menores que en el modelo sin calibrar. El RMSE varía de 0.9 a 12 ajustándose mejor el modelo calibrado. De igual forma, ocurre en Masatepe con excepción de la parcela *Inga edulis*-AC que pierde ajuste aumentando el RMSE en 6.4. Aquiares presenta valores elevados de RMSE a diferencia de las otras parcelas.

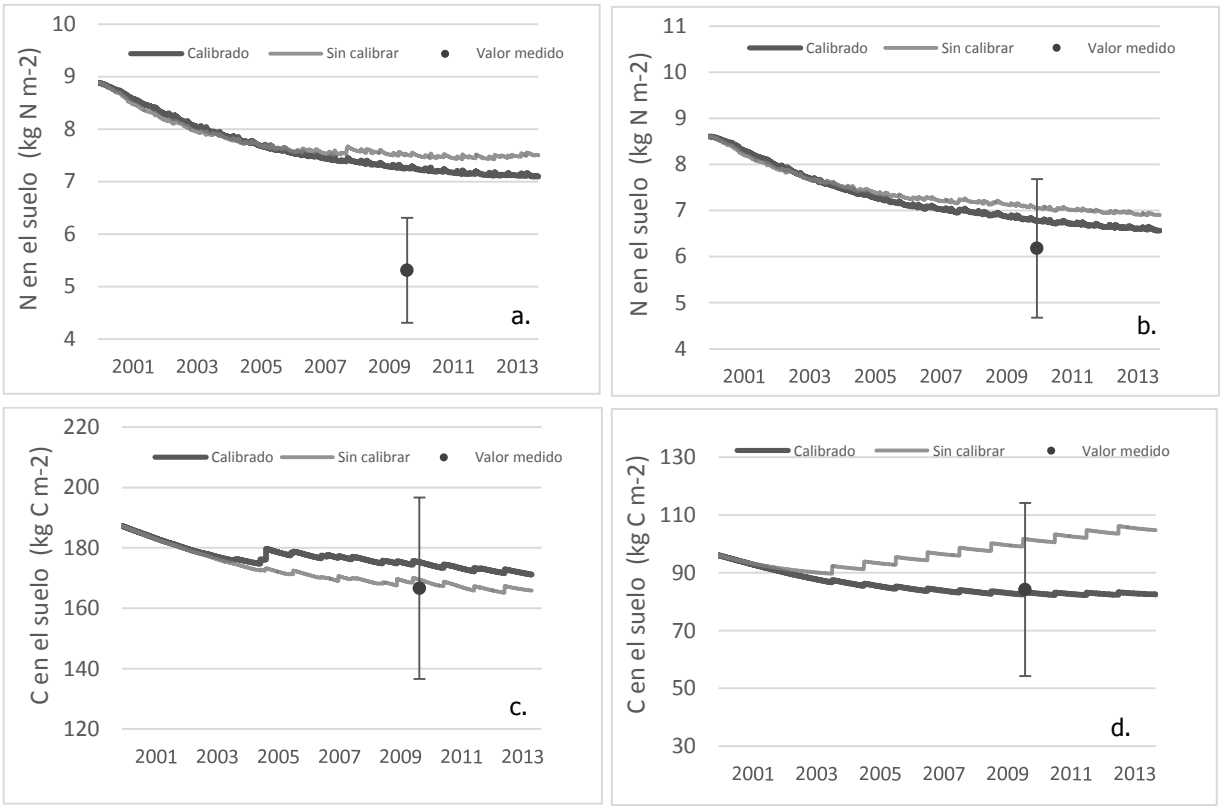

Figura 10. Contenido de carbono y nitrógeno en el suelo.
a. Erythrina poepiggiana – MC; b. Terminalia amazonia – MC; c. Inga edulis – AC; d. Pleno sol – AC.

En la figura 10 c y d se muestra el contenido de carbono en el suelo para las parcelas *Inga edulis* – AC y pleno sol –AC en Turrialba donde se puede observar los valores medidos, el modelo calibrado y sin calibrar.

Calibración multisitio.

La calibración multisitio se realizó por el grupo de parcelas que estaban dentro de cada análisis de conglomerados y tomando las parcelas juntas. Dos grupos se conformaron del análisis de conglomerados; el primero con 6 parcelas ubicadas en Turrialba y en el segundo con 4 parcelas ubicadas en Masatepe.

En todas las parcelas, se calibró los parámetros de café y se especificaron los parámetros de árbol y suelo que cambian por sitio. Así se realizó por cada conglomerado y en el conjunto de todas las parcelas.

Los valores *a priori*, máximo y mínimos de cada parámetro a calibrar - por donde se mueve iterativamente el programa - se definieron como el valor por defecto. Se realizaron análisis de sensibilidad de algunos parámetros para ajustar sus valores y tener mayores aceptaciones del modelo. Mayores aceptaciones refleja que el modelo se está ajustando a las variables medidas.

En las especificaciones de los valores y sitios de los parámetros, se fijó los parámetros de café para que se calibraran teniendo en cuenta todos los sitios. Esto quiere decir que el resultado de los parámetros calibrados en el módulo de café es igual para todos los sitios.

La Figura 11 muestra el RMSE de las calibraciones individual, por conglomerado (Turrialba&Masatepe), multisitio (todas las parcelas) y sin calibrar para la producción de café en t MS ha-1 y-1. Las parcelas sin calibrar, generalmente, son los valores más altos de RMSE sugiriendo que un modelo calibrado se ajusta más a los datos medidos.

Las parcelas de pleno sol AC y MC en Turrialba, poró MC, Aquiares, Llano Bonito y pleno sol AC en Masatepe pierden RMSE en promedio de 0.3 a medida que aumenta los sitios conjuntos a calibrar (calibración individual -> Turrialba&Masatepe -> Multisitio). Las parcelas con bajos RMSE (<0.8) y que indican mejor ajuste del modelo se reparten en un 25% de parcelas con calibraciones individuales, 41% de parcelas con calibraciones por conglomerado y un 16% con calibraciones multisitio.

En general, Llano Bonito presenta menor RMSE para todas las calibraciones debido a los pocos datos medidos. La parcela pleno sol AC en Turrialba tiene valores de RMSE más altos con cifras de 2.6 sin calibrar, 2 en multisitio, 1.32 en Turrialba y 1.09 a nivel individual.

La Figura 12 muestra la calibración de *Terminalia amazonia* - MC en forma individual, por conglomerado y en conjunto de todas las parcelas. La peor simulación es la que no tiene calibración, mientras que la simulación de la producción a nivel de calibración individual y en Turrialba (conglomerado) sobrestima la producción medida en las últimas cosechas. El RMSE es mayor en estas dos calibraciones, ya que pueden simular muy bien las altas cosechas de los años 2005-2006 y 2007-2008. En la calibración multisitio, el modelo no puede simular bien los picos de cosecha de los años antes descritos y; por el contrario de las simulaciones individuales y en Turrialba, puede simular muy bien las cosechas de los últimos años.

Ninguna de las simulaciones en las calibraciones por sitio, Turrialba y multisitio, así como sin calibrar pudo representar la baja cosecha del año 2006-2007.

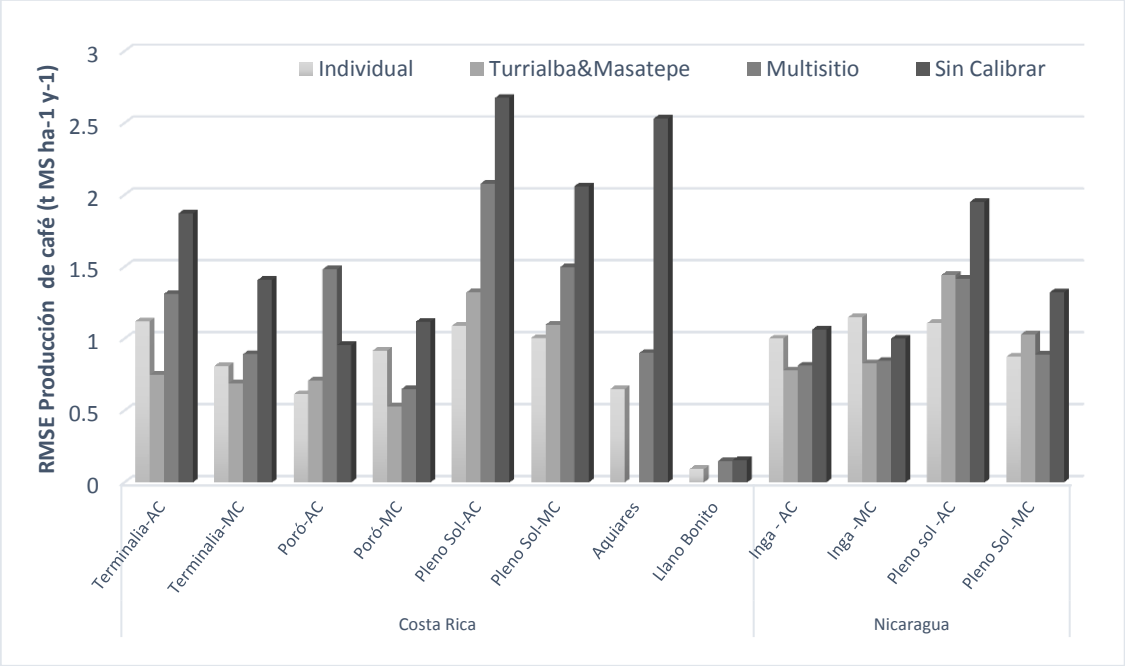

Figura 11. RMSE para la producción de café (t MS ha-1 y-1) de 12 parcelas de estudio con diferentes calibraciones
Individual se refiere a la calibración por cada sitio; Turrialba&Masatepe es la calibración por cada uno de los conglomerados; multisitio es la calibración en todas las parcelas; sin calibrar es la simulación con los datos por defecto.

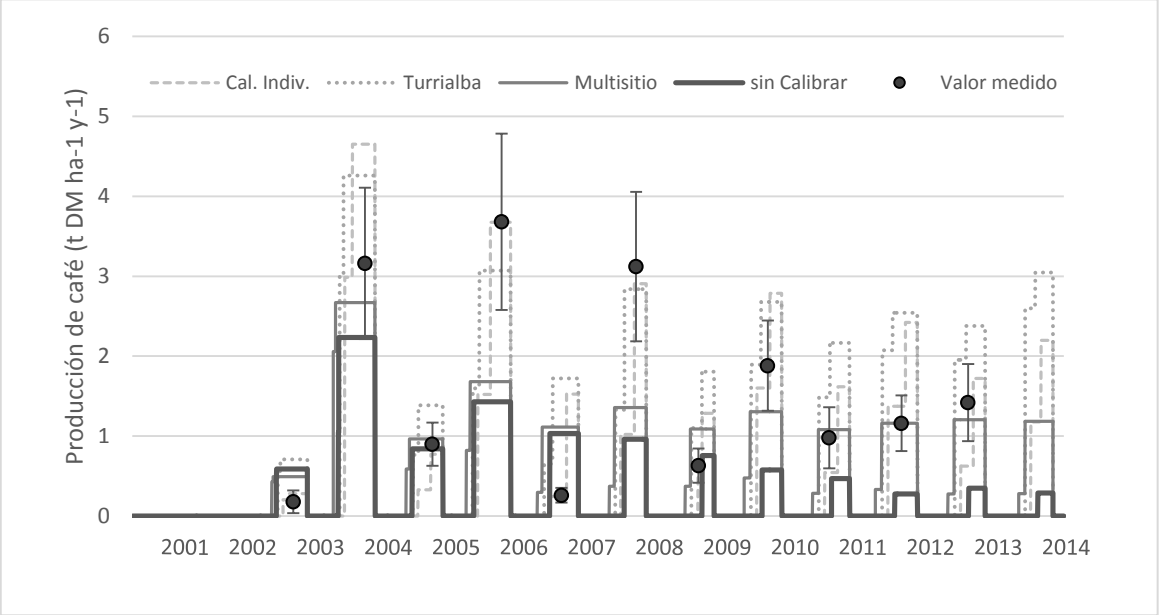

Figura 12. Simulaciones de la producción de café (t MS ha-1 y-1) en la parcela *Terminalia amazonia* - MC con calibraciones individuales, conglomerado (turrialba) y multisitio
Individual se refiere a la calibración por cada sitio; Turrialba&Masatepe es la calibración por cada uno de los conglomerados; multisitio es la calibración en todas las parcelas; sin calibrar es la simulación con los datos por defecto.

El coeficiente de determinación para la calibración en Turrialba (conglomerado) tiene un valor de 0.54, le sigue la calibración multisitio con 0.41 y finalmente Masatepe con 0.23. Tal como se vio en la calibración por sitio, las parcelas de Masatepe cuentan con R^2 bajos; sin

embargo, el RMSE en la calibración por conglomerado mejora 2 parcelas así como por multisitio (Figura 13).

Algunos puntos de los valores simulados para Turrialba subestiman la producción de café alejándose de la recta. En Masatepe, una nube de puntos se aleja de la recta subestimando los datos medidos. Para la calibración multisitio, una buena parte de los puntos subestiman el modelo, principalmente por los puntos de Masatepe; sin embargo, hay otros puntos que están muy cerca de la recta, lo cual indica que estos valores pesaron en el momento de subir el R^2 total.

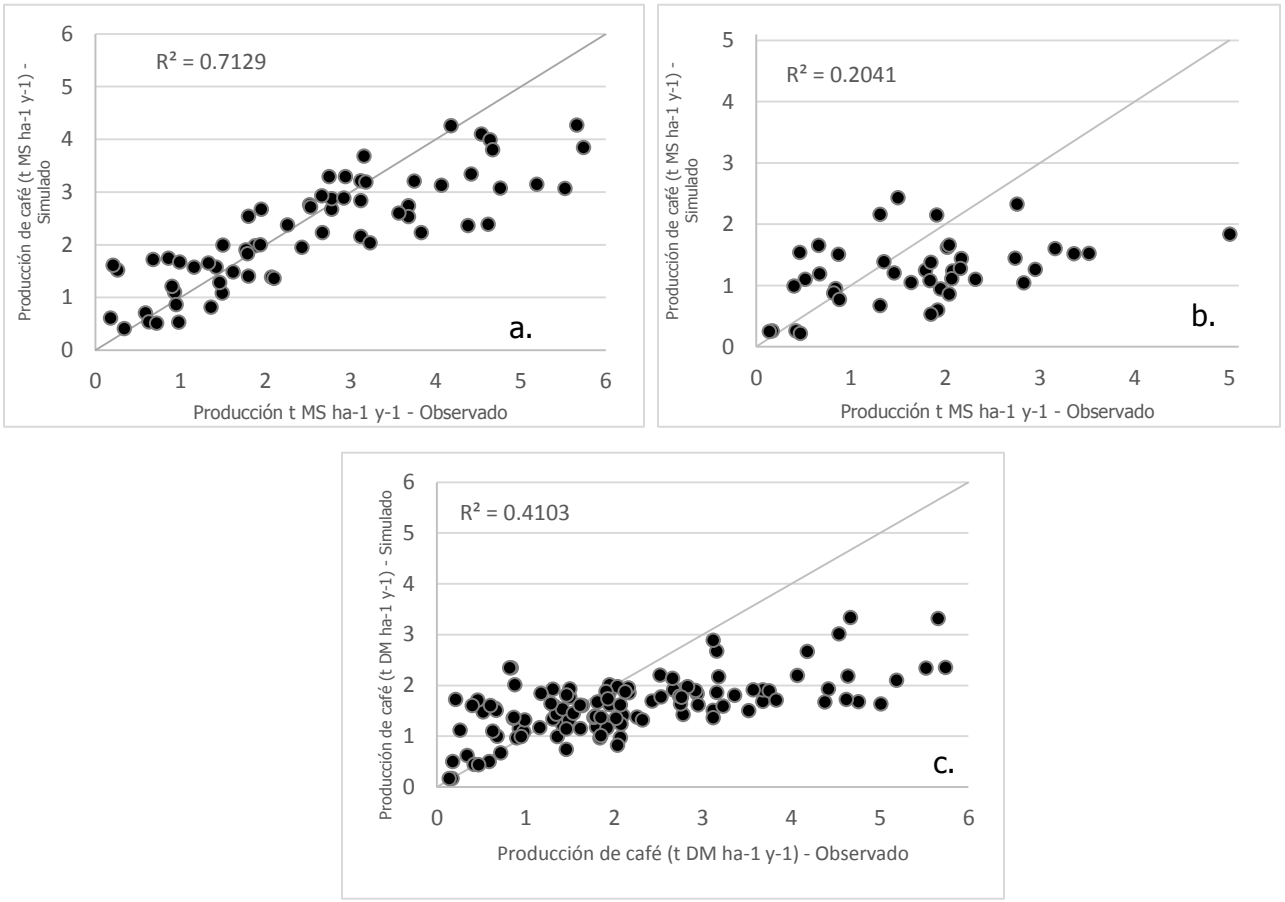

Figura 13. Coeficiente de determinación para la calibración por conglomerados y multisitio.
a. Turrialba b. Masatepe; c. Multisitio

Las simulaciones para el contenido de nitrógeno en el suelo (Figura 14) muestran valores de RMSE entre 0.04 y 7.7 independiente del modelo calibrado o sin calibrar. La calibración multisitio en la parcela *Terminalia amazonia* con un manejo medio convencional presenta el mejor ajuste; mientras que Aquiares presenta un bajo ajuste con valores de RMSE entre 4 y 8.

Para las parcelas de Masatepe, el mejor ajuste lo presenta la calibración multisitio con valores entre 0.04 y 7.7. El valor máximo de RMSE corresponde a la parcela de Aquiares. Sin embargo, a nivel general este modelo es el que mejor simula el nitrógeno en el suelo.

El contenido de carbono en el suelo (Figura 15) mejora con las calibraciones por sitio, multisitio y por conglomerado (Turrialba&Masatepe). Para las parcelas ubicadas en Turrialba, las calibraciones por conglomerado se ajustan bien al igual que las calibraciones por multisitio, a excepción de pleno sol - AC. Las calibraciones en dos parcelas ubicadas en Turrialba pierden un máximo de 3 en RMSE al pasar de una calibración por conglomerado (Turrialba&Masatepe) a multisitio mientras que en las parcelas restantes pierde muy poco (1) e incluso gana RMSE.

La parcela pleno sol con manejo alto convencional presenta valores bajos de RMSE, y la calibración individual es la que mejor se ajusta. La parcela que no se ajusta bien al carbono en el suelo medido es el simulado con calibraciones en Aquiares seguido de pleno sol – MC en Masatepe. Estas parcelas presentan un RMSE mayor a 13 mientras que las demás parcelas no llegan a estos valores y sus RMSE varían entre 0.05 a 9 y 0.67 a 15 en la calibración por conglomerado (Turrialba&Masatepe) y multisitio, respectivamente.

Con un promedio de RMSE de 5.5, la calibración multisitio es la que mejor simula los contenidos de carbono en el suelo; sin embargo, la calibración por conglomerado (Turrialba&Masatepe) presenta valores bajos de RMSE en parcelas como *Terminalia amazonia* MC y AC e *Inga edulis* – AC.

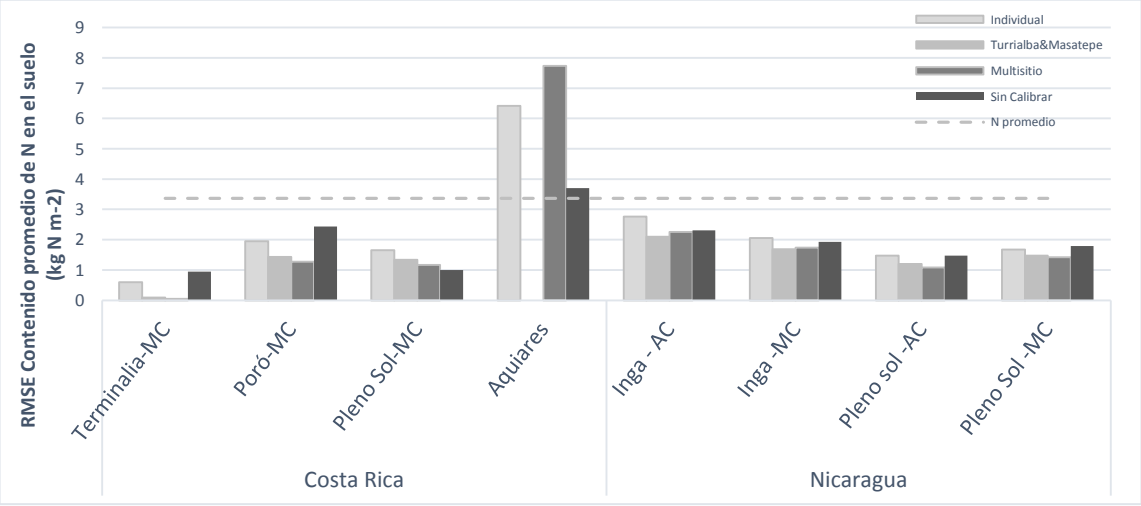

Figura 14. Calibración individual, por conglomerado y multisitio para el contenido de nitrógeno en el suelo (kg N m-2) en las parcelas de estudio.
Individual se refiere a la calibración por cada sitio; Turrialba&Masatepe es la calibración por cada uno de los conglomerados; multisitio es la calibración en todas las parcelas; sin calibrar es la simulación con los datos por defecto.

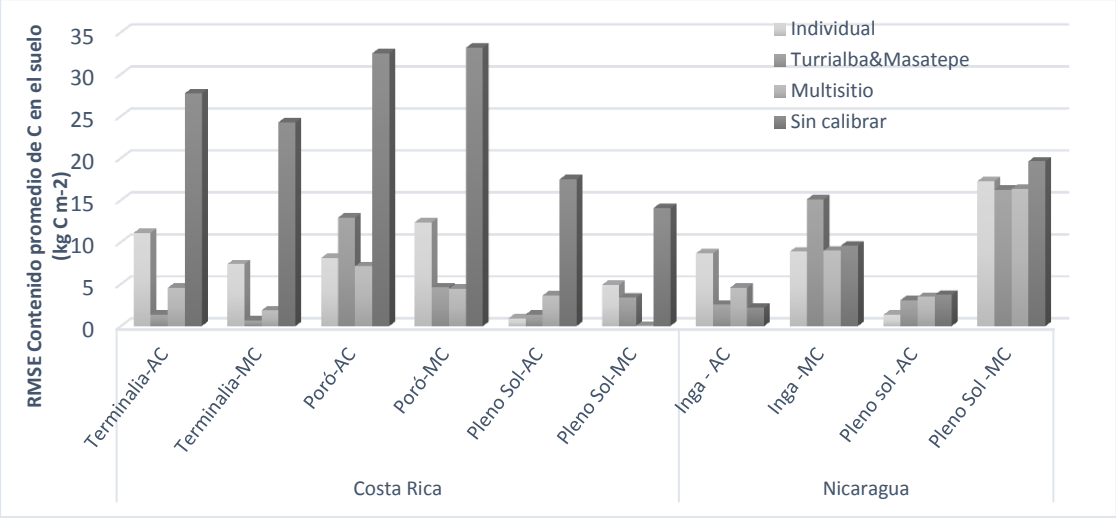

Figura 15. Calibración individual, por conglomerado y multisitio para el contenido de carbono en el suelo (kg C m-2) en las parcelas de estudio.
Individual se refiere a la calibración por cada sitio; Turrialba&Masatepe es la calibración por cada uno de los conglomerados; multisitio es la calibración en todas las parcelas; sin calibrar es la simulación con los datos por defecto.

2.5.5 Validación

Para la validación, se recopiló información de fincas no experimentales. La información de manejo se dificulta, ya que los caficultores no acostumbran a llevar registros, que da en muchas ocasiones un estimado.

Se validó el modelo calibrado con simulaciones de la finca la Hammonia en Nicaragua. La finca se encuentra ubicada en Matagalpa en el conglomerado uno (Seco-frío) y cuenta con varias parcelas. Se escogió la parcela Mitch (Figura 16) que se caracteriza por tener 16 años de estar sembrada con la variedad caturra, tiene un área de 17.91mz y bajo sombra predominante de guaba.

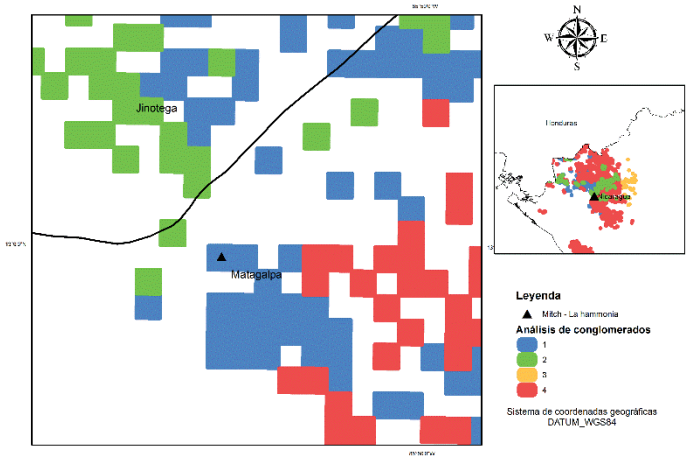

Figura 16. Parcela de validación Mitch – La hammonia.

Como muestra la Figura 17, el modelo se comporta relativamente bien y existe una diferencia baja entre los modelos calibrados. Se determinó un RMSE de 0.83 con los parámetros sin calibrar y un RMSE de 0.45 y 0.5 para los calibrados por multisitio y por

conglomerado, respectivamente. Esta última simulación sugiere que el modelo se ajusta mejor con los parámetros de calibración que con los del modelo sin calibrar, incluso en la finca que se encuentra fuera de los tres conglomerados climáticos.

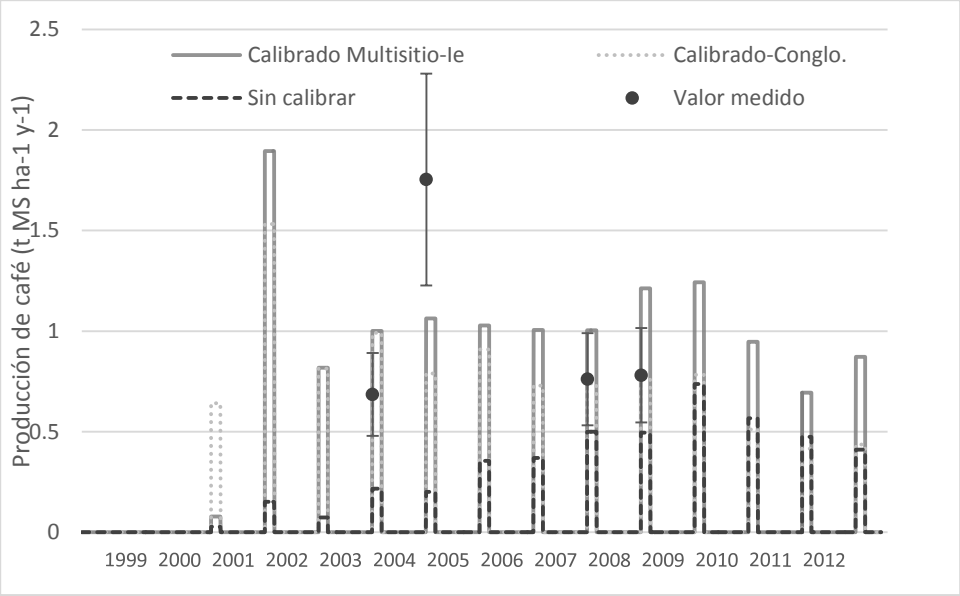

Figura 17. Simulaciones con parámetros de la calibración multisitio y sin calibrar para la finca cafetera Hammonia – parcela Mitch.
Calibrado-Conglo. Es la calibración por conglomerado (Turrialba); Calibrado Multisitio-Ie es la calibración en todas las parcelas conjuntas tomando el valor de la pacerla Inga edulis; sin calibrar es la simulación con los datos por defecto.

2.5 Discusiones

La calibración bayesiana utilizando las MCMC es un método que se ajusta relativamente bien a los parámetros del modelo CAF2007 en forma individual, por conglomerado y por multisitio.

En la calibración por parcela, los RMSE correspondientes a las parcelas de Costa Rica para la producción de café (t DM ha^{-1} $año^{-1}$) presentaron valores bajos entre 0.09 a 1.12 y un coeficiente de determinación alto de 0.52 a 0.87. Estos valores sugieren que el modelo tiene un buen comportamiento y se debe a la información en detalle de los parámetros de inicio, así como al manejo de la parcela y la distribución de los parámetros *a priori*.

Los principales parámetros modificados en estas parcelas son: parámetro para calcular la fuerza de sumidero de los órganos de almacenamiento (KSINKPPAR), constante de fuerza de sumidero de los órganos de almacenamiento (SINKPMAX), fuerza de sumidero de la raíces (SINKR), rubisco (RUBISC), promedio de esperanza de vida de las raíces del café TCCR, constante alométrica que vincula la biomasa -C- de las ramas con el área de copa (KAC) y la tasa máxima de fuerza en los órganos de almacenamiento (FSINKPMAX0).

Los patrones de asignación de carbono son explicadas a partir de teorías alométricas y ellas sugieren que la producción metabólica y biomasa son repartidas entre las partes de la planta y que pueden cambiar por el manejo que se le puede dar al cultivo (Génard *et al.* 2008). De allí la importancia de la modificación de los parámetros KSINKPPAR y SINKPMAX.

El modelo CAF2007 tiene en cuenta la poda del café, la sombra, la tasa fotosintéticamente activa y la bienalidad para la producción de los granos de café. Sin embargo, tiene constates fijas de fuerza de sumidero por cada parte de la planta a excepción de los órganos de almacenamiento.

El KSINKPPAR tiene valor por defecto de 0.55 y aumenta en promedio 47% con la calibración; mientras que SINKPMAX cambia de 3.6 a un promedio de 40. La fuerza de sumidero aumenta ya que al modelo se le dificultaba alcanzar el carbono necesario para la producción biomasa (C) en los granos de café.

Al incrementar la fuerza de sumidero de los granos, el crecimiento de las ramas y el desarrollo de la planta se ve reducido como ocurre levemente en las simulaciones, ya que la fuerza de sumidero de las raíces (SINKR) también incrementó. Vaast *et al.* (2005) y Génard *et al.* (2008) aseguran que los carbohidratos son preferiblemente asignados a los granos de café y que se presenta mayor grano caído y muerte de ramas, lo cual resulta en un fuerte patrón de alternancia (bienalidad).

Otro parámetro calibrado es el RUBISC (ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa). Es una proteína-enzima que interviene en dos procesos: fijación de CO^2 y en la fotorespiración determinada por la carboxilasa y oxigenasa, respectivamente. La tasa fotosintética es influenciada principalmente por la temperatura, cantidad de luz interceptada, disponibilidad de agua, nutrientes y de los niveles de CO^2 de la atmosfera (Salvucci y Crafts-Brandner 2004).

El valor inicial del rubisco en el modelo es de 0.54 g m^{-2} y después de la calibración incrementó a un valor promedio de 2.1 g m^{-2}, ajustándose a los rangos determinados por Kanechi *et al.* (1996).

El TCCR afecta el crecimiento y productividad de la planta, la competencia, el ciclo del carbono y los nutrientes en el suelo (Eissenstat y Yanai 1997). Defrenet (2012) estimó el promedio de esperanza de vida de las raíces finas del café en 1.29 años. Mientras que el modelo utiliza el promedio de esperanza de vida de las raíces como valor de defecto 2000 días, el modelo calibrado triplica este valor. Al incrementarlo, no hay un retorno de carbono al suelo por parte de las raíces que se mueren. Sin embargo, el carbono en el suelo en promedio tiene un RMSE de 17 kg de C m^{-2} que generalmente sobrestima el modelo.

El KAC es la constante alométrica que vincula la biomasa -C- de las ramas con el área de copa en m2 para el módulo de árbol de sombra. Esta variable influye directamente en el área de copa y en el área de sombra. Su valor de defecto es 17 y varía dependiendo de la especie del árbol. Para la calibración con *Erithrina poepiggiana,* el área de copa (CAtree) y KAC en conjunto no tenían un buen ajuste, pues el modelo no distingue claros dentro del área de copa y sobrestima el área de sombra.

Finalmente, la tasa máxima de fuerza en los órganos de almacenamiento (FSINKPMAX0) afecta la producción en el primer año productivo. Este parámetro es nuevo y permite adecuar el modelo a la primera cosecha irregular del café. El valor inicial es de 0.2 y el modelo calibrado varía entre 0.3 a 0.8.

En Masatepe, el comportamiento de los parámetros es similar a excepción de la especie de árbol de sombra. Se calibró el modelo con *Inga edulis,* sin embargo, la parcela en el

momento de estar establecida tenía otra especie que pudo crear sesgos en la calibración. Masatepe posee un tapeltate que cambia con la profundidad por cada parcela.

Las calibraciones de pleno sol en Masatepe presentan un ajuste bajo y un R^2 máximo de 0.4. Estas parcelas presentan problemas en las plantas de café que pueden deberse a varios factores externos como plagas, enfermedades, tapeltate muy cercano a la superficie y otros manejos. Se recomienda investigar más de la parcela.

Los mismos parámetros se determinaron como los principales en las calibraciones por conglomerado y multisitio. Los valores de RMSE son valores cercanos a los individuales y poseen parámetros iguales para el módulo de café con el objetivo de reducir la incertidumbre.

En Aquiares y Llano Bonito, se corrieron calibraciones por sitio con valores similares a los descritos en Turrialba, el gran inconveniente es que el modelo es sensible al carbono inicial del árbol, y al área de copa.

El modelo funciona relativamente bien con un R^2 0,4, se recomienda adicionar el factor forma de copa del árbol de sombra, incluir tasas de renovación del árbol y de la planta de café. Los parámetros calibrados por multisitio se ajustan relativamente bien, por lo cual se debe validar en otras fincas cafeteras.

2.6 Conclusiones

Es indispensable un alto grado de veracidad en los datos de las fincas de estudio para la calibración del modelo. Valores con tendencias extrañas causan ruido en la calibración y repercuten en los resultados. El manejo en cada parcela también es fundamental; ya que las podas del café y del árbol de sombra, fertilizaciones, raleos y densidades de árboles influyen directamente en las salidas del modelo.

Las condiciones iniciales de contenido de carbono en el árbol y café, del nitrógeno y carbono en el suelo también son fundamentales, pues de allí se parte toda la simulación. Aquiares fue una parcela difícil de modelar, ya que se inició cuando el cultivo tenía 20 años y no se contaba con un análisis preliminar de suelos.

La simulación de la producción de café (t MS ha-1 año-1) con el modelo original subestima la producción notablemente; mientras que el modelo calibrado mejora las producciones bajando el RMSE.

Las calibraciones por conglomerado expresan diferentes RMSE, lo cual mejora en general las producciones simuladas al igual que la calibración multisitio frente al modelo original (sin calibrar). Sin embargo, cuando se pasa de una calibración individual a una por conglomerado y finalmente a multisitio (parcelas pleno sol AC y MC en Turrialba, Llano Bonito, Aquiares y pleno sol MC), se pierde un 0.3 de RMSE.

La calibración por conglomerados – Turrialba - tiene un R^2 alto de 0.71; mientras que la calibración por conglomerado – Masatepe - es bajo 0.2, siendo que el modelo calibrado se ajusta mejor a las producciones medidas en Turrialba y caso contrario en Masatepe. El R^2 para la calibración multisitio es de 0.41, el cual hace un error medio entre todos los datos bajando un poco la incertidumbre entre los sitios.

Se eligió los parámetros calibrados resultantes de la calibración multisitio para validar el modelo en la parcela Mitch con sombra de guaba de la finca la Hammonia, ubicada en Matagalpa, Nicaragua. Esta finca posee condiciones ambientales (seco-frío) que no se encuentran dentro de los sitios calibrados (Turrialba: caliente – húmeda, Llano Bonito: fría-húmeda y Masatepe: seca - caliente). El árbol de sombra fue calibrado en Masatepe y se tomaron dichos valores para correr la simulación de validación. Los resultados demuestran que se obtuvo un mejor RMSE 0.45 para la parcela simulada con los parámetros calibrados por multisitio que sin calibrar (RMSE 0.85).

El modelo calibrado mejora en RMSE para la producción anual de café en la finca cafetera Mitch que se encuentra fuera de las zonas climáticas utilizadas para calibrar el modelo. Sin embargo, se requiere de más validaciones en otras fincas cafeteras para demostrar que el modelo calibrado está simulando bien las producciones.

2.7 Literatura citada

Bertrand, B.; Rapidel, B. 1999. Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San José, CR, Agroamérica.

Blanco, M.; Haggar, J.; Moraga, P.; del Carmen Madriz, J.; Pavón, G. 2003. Morfología del café (Coffea arabica L.), en lotes comerciales de Nicaragua. Agronomía Mesoamericana. 14(1): 97-104.

Cafeteros, F.N.d. Guía ambiental para el sector cafetero Federación Nacional de Cafeteros, (2).

Charbonnier, F. 2013. Measuring and modelling light, water and carbon budgets and net primary productivity in a coffee-based agroforestry system of Costa Rica. PhD. Ecole doctorale RP2E. Université de Nancy 54 p.

Defrenet, E. 2012. Évaluation de la biomasse et de la productivité souterraines du caféier dans un système agroforestier au Costa Rica. AGROCAMPUS OUEST. 42 p.

Eissenstat, D.; Yanai, R. 1997. The ecology of root lifespan. Advances in ecological research. 27: 1-60.

Fassbender, H.; Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en en suelos de América Latina IICA. 420 p.

Fischerworring, B.; Robkamp, R. 2001. Guía para la caficultura ecológica. Deutsche Gesellschft feir Technische Zusammenarbeit Alemania, 149 p.

Génard, M.; Dauzat, J.; Franck, N.; Lescourret, F.; Moitrier, N.; Vaast, P.; Vercambre, G. 2008. Carbon allocation in fruit trees: from theory to modelling. Trees. 22(3): 269-282.

Kanechi, M.; Uchida, N.; Yasuda, T.; Yamaguchi, T. 1996. Non-stomatal inhibition associated with inactivation of Rubisco in dehydrated coffee leaves under unshaded and shaded conditions. Plant and cell physiology. 37(4): 455-460.

Martínez, E.; Fuentes, J.P.; Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. 8: 68-96. Disponible en http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912008000100006&nrm=iso

Moraga, P.Q.; Bolaños, I.R.T.; Pilz, M.; Munguía, R.H.; Jürgen, A.H.P.; Barios, M.; Haggar, J.; Gamboa, W.M. 2011. Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de café (coffea arabica l.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. La Calera. 11(17): 41-47.

Reinds, G.J.; Van Oijen, M.; Heuvelink, G.B.M.; Kros, H. 2008. Bayesian calibration of the VSD soil acidification model using European forest monitoring data. Geoderma. 146((3-4)): 475-488. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.06.022

Salvucci, M.E.; Crafts-Brandner, S.J. 2004. Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of Rubisco as a limiting factor in photosynthesis. Physiologia plantarum. 120(2): 179-186.

Segura, A. 1990. Algunas características fisiológicas del cafeto y su relación con la nutrición mineral. VIII Curso Regional Sobre Fundamentos de la Caficultura Moderna. Módulo IV. Del 9 de Julio al 10 de agosto de 1999. IICA/PROMECAFE. Turrialba, CR.

Vaast, P.; Angrand, J.; Franck, N.; Dauzat, J.; Génard, M. 2005. Fruit load and branch ring-barking affect carbon allocation and photosynthesis of leaf and fruit of Coffea arabica in the field. Tree Physiology. 25(6): 753-760.

Van Oijen, M.; Rougier, J.; Smith, R. 2005. Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. Tree Physiology. 25(7): 915-927. Disponible en http://treephys.oxfordjournals.org/content/25/7/915.abstract 10.1093/treephys/25.7.915

Van Oijen, M.; Dauzat, J.; Harmand, J.-M.; Lawson, G.; Vaast, P. 2009. Plot-scale modelling of coffee agroforestry systems in Central America. Modelling Agroforestry Systems. 191-202.

Virginio-Filho, E.d.M.; Orozco Estrada, S.; Sheck, R. 2012. Ensayo de Sistemas Agroforestales con Café: más de una década de resultados pioneros en el mundo. Turrialba, Costa Rica.

3. ARTÍCULO II. Modelación de plantaciones de café usando CAF2007 para evaluar la adaptación al cambio climático en Nicaragua y Costa Rica.

3.1 Resumen

Varios autores predicen que el impacto del cambio climático en el cultivo de café reducirá la productividad de la planta de café. Existen muchos modelos para simular este impacto y dependiendo de sus objetivos así mismo serán los requisitos de entrada del modelo. En este estudio, se usó el modelo CAF2007 para integrar los procesos y mecanismos que generalmente operan en el cultivo de café bajo sistemas agroforestales y determinar los efectos de los cambios en el clima en los rendimientos promedios anual de café. Se empleó la parcela de *Terminalia amazonia* y *Erythrina poepiggiana* con tratamientos medio convencional en Turrialba y Pleno sol MC en Masatepe utilizando los parámetros calibrados del modelo multisitio del artículo uno.

Las simulaciones demuestran que los cambios en las precipitaciones promedio anual afectarán las producciones del cultivo de café dependiendo de las condiciones del sitio. En Turrialba, por presentar precipitaciones superiores a las óptimas, una disminución de precipitación aumentará las producciones de café hasta el límite óptimo; sin embargo, en Masatepe una disminución afectará negativamente la producción del cultivo ya que las condiciones del sitio son caliente-seco.

Aumentos de temperatura afectan directamente la producción de café. Sin embargo, esto cambia con el tipo, área y densidad de sombra que tenga la parcela. El aumento de CO_2 afecta positivamente la planta. Posiblemente, se debe a los efectos de fertilización que se tiene en la planta al tener un mejor uso del agua.

Bajo el modelo de circulación global MROC5 y un RCP8.5 y concentraciones de CO_2 de 380 ppm fijadas en el modelo la producción de café baja. El modelo presenta en general características de disminución de precipitación y aumentos de la temperatura promedio anual que limitan la producción de la planta. Sin embargo, al aumentar las concentraciones de CO_2 en la atmosfera 541 ppm la producción aumenta un 10%.

El modelo no simula el efecto del CO_2 a través del tiempo ni tiene en cuenta cómo afecta otros procesos a la planta; ya que no hay estudios a largo plazo y solo estudios recientes comienzan a ver efectos sobre los nutrientes de la planta.

Palabras claves:

Impacto, Cambio climático, Café, CAF2007, Modelación

3.2 Introducción

Diferentes estudios predicen que el café arábigo en Centroamérica tendrá una reducción de área apta para su producción debido al cambio climático (Schroth *et al.* 2009; Läderach *et al.* 2010). Generalmente, se usan modelos simples, mecanísticos o que ayudan a la decisión espacial; ya que simulan impactos potenciales de los factores ambientales en los ecosistemas naturales. Sin embargo, muchos de estos modelos no tienen en cuenta los mecanismos y los procesos que generalmente operan en la planta como es el uso eficiente del agua en la producción o en la fotosíntesis (Lambers et al 2008) que puede verse afectado con el aumento de CO_2 y por supuesto en la respuesta de la planta a estas condiciones.

CAF2007 es un modelo de procesos básicos que tiene en cuenta los mecanismos básicos fisiológicos de la planta de café y que interactúa con la sombra de especies maderables, parámetros de suelo y variables de clima. Estas interacciones permiten obtener una mejor aproximación de la realidad, así como la evaluación de posibles cambios en la cosecha, debido a cambios en patrones de clima y manejo del cultivo.

CAF2007 se vuelve una herramienta útil para toma de decisiones en el manejo, producción e inversión en el cultivo, permitiendo diseñar estrategias de adaptación frente al cambio climático. Muchos estudios se han realizado para determinar el efecto del cambio climático en los cultivos, pero muy pocos consideran adaptación o metodologías en combinación entre impacto y adaptación (White *et al.* 2011).

Este artículo pretende hacer simulaciones de café usando CAF2007 calibrado por multi sitio, como se determinó en el artículo anterior para el año 2050 con un escenario de emisión de CO_2 (RCP 8.5) que es el escenario más pesimista y con el modelo climático global MIROC5 (Watanabe *et al.* 2010), que cuenta con mejoras en la precipitación, oscilaciones del Fenómeno del niño y la Niña, entre otros. Se busca determinar el impacto del cambio climático en caturra para las parcelas de estudio en Nicaragua y Costa Rica.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en la zona cafetera de dos países pertenecientes al área de estudio del proyecto "Sensibilidad y adaptación del café al cambio climático en Centroamérica: CafAdapt", Nicaragua y Costa Rica.

Se utilizaron las parcelas de las fincas de café de Turrialba y Masatepe que se calibraron en el primer artículo (Figura 18).

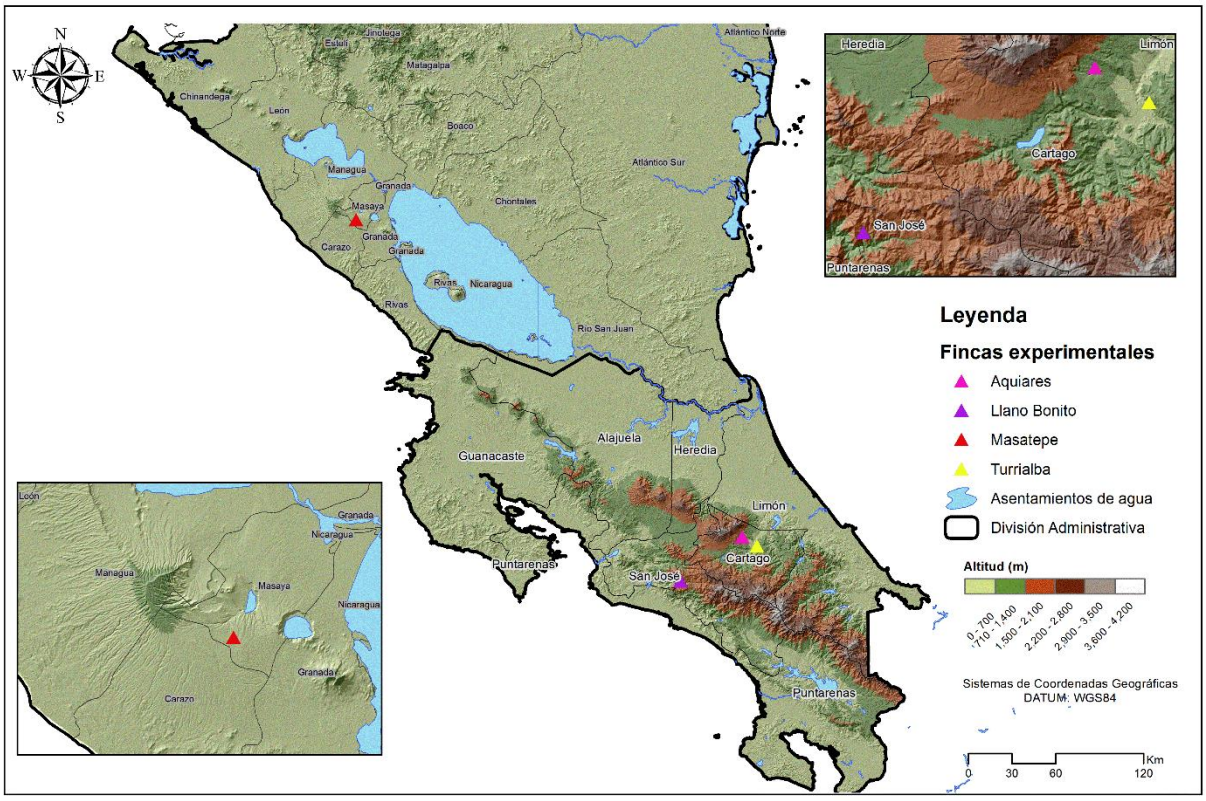

Figura 18. Fincas cafeteras del estudio en Nicaragua y Costa Rica

3.3.2 Descripción del área de estudio

Se seleccionaron 3 parcelas de café en Costa Rica y Nicaragua con la variedad caturra y pacas. Para las parcelas seleccionadas, se tuvo en cuenta las mejores simulaciones del modelo calibrado (artículo 1).

Finca experimental del CATIE - Cartago, Costa Rica

Se encuentra ubicado a 600 m.s.n.m en el cantón de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica. Presenta una precipitación promedio anual de 2038 mm y una temperatura media de 22°C. Los suelos tienen una textura franco a franco-arcillosa y una humedad relativa de 90%.

Se escogieron los tratamientos: medio convencional con sombra de amarillón (*Terminalia amazonia)* y poró (*Erythrina poeppigiana)* con la variedad Caturra.

Ensayo de café de la zona baja seca en Masatepe, Nicaragua

El ensayo está ubicado a 453 m.s.n.m. en el Centro de Capacitación y Servicios Regionales del Café del Pacífico Sur – UNICAFE con dos repeticiones y una tercera repetición fue establecida en el año 2001 en el Centro Experimental Campos Azules (CECA) del INTA, en el municipio de Masatepe, departamento de Masaya, Nicaragua.

Se caracteriza por una precipitación promedio anual de 1400 mm, temperaturas promedios de 24°C y una humedad relativa entre 70-80%. Los suelos son moderadamente profundos, bien drenados, son suelos franco a franco-arcillosos.

Se escogió la parcela de pacas a pleno solo con un manejo medio convencional, pues fue la que tuvo un R^2 mayor en las calibraciones de Nicaragua.

3.3.3 Procedimiento metodológico

Para determinar el impacto del cambio climático en el cultivo de café se utilizó el modelo calibrado multisitio del capítulo 1. Se usaron las parcelas de café con diferentes condiciones de clima, árbol de sombra y manejo como se describe en la sección anterior.

Las simulaciones del modelo se hicieron bajo dos metodologías: la primera adicionando a las variables climáticas aumentos de temperatura y CO_2 y disminuyendo las precipitaciones como lo sugieren estudios realizados en Centroamérica y el segundo con la proyección del clima usando escenarios de clima. Se usó el RCP 8.5 con el modelo de circulación global MIROC5 y para la parcela *Terminalia amazonia* – MC. Este escenario se considera el más pesimista.

Modificación de las variables climáticas

Las condiciones del clima afectan directamente el desarrollo del cultivo de café; ya que influyen en los procesos químicos de la planta. La temperatura para café arábigo varía dependiendo del estado de desarrollo. El rango de temperatura media anual óptimo para el café arábigo es de 18 – 21°C (Damatta y Ramalho 2006a). Por encima de los 23°C, el desarrollo y maduración de frutos se aceleran, a menudo produce pérdida de calidad (Alegre 1959), pero hay rendimientos satisfactorios en plantaciones bajo condiciones de gestión intensiva en regiones marginales con temperaturas altas de 24-25°C como en el noreste de Brasil.

La fotosíntesis en el rango normal de estación de crecimiento se reduce por las condiciones de temperaturas bajas, ya que la tasa de transporte del electrón y procesos bioquímicos son directamente reducidos (Lambers *et al.* 2008). Las condiciones de altas temperaturas afectan el Rubisco, que puede llegar a estar inactivo y afectar directamente el desarrollo de la planta.

La exposición continua a temperaturas mayores de 30°C retardaría el crecimiento y se expresaría anomalías como el color amarillento de las hojas y tumores en la base del tallo (Franco 1958). Si la temperatura es relativamente alta durante el florecimiento y relacionada con una estación seca prolongada, puede causar aborto de las flores.

La distribución de las lluvias y existencia de un periodo de sequía favorece el crecimiento del cafeto. Según la variedad y el lugar donde se encuentra el cultivo (localidad), el factor que más afecta el grano de café es el suministro de agua durante el periodo de llenado de la cereza de café. La distribución de las lluvias, por ende, repercute en la calidad del fruto, el desarrollo de otros órganos como crecimiento de la raíz, formación de las ramas e iniciación floral (Suárez Serrato 1979).

El exceso de lluvias afecta la floración del cafetal, ocasiona cosechas dispersas y bajos rendimiento. Si la pendiente es pronunciada puede presentarse problemas de erosión, lavado de nutrientes y dificultad para las labores de cosecha.

El contenido de CO_2 en la atmosfera en los últimos años ha venido incrementado pasando de 388 ppm en 2010 a 395.93 ppm en 2014, así lo reporta el observatorio Mauna Loa en Hawái. El incremento del CO_2 en la atmosfera altera los procesos de las plantas, rendimientos y calidad. Estos valores se pueden tomar como una fertilización de CO_2 que afectan el rendimiento del cultivo, ya que interviene en las altas tasas de carboxilación, lo cual reduce la fotorrespiración (Ramalho *et al.* 2013; Martins *et al.* 2014). Sin embargo, no existe una amplia información del efecto del CO_2 en la fisiología de las plantas de café y la sensibilidad frente al cambio climático.

La metodología consiste en correr el modelo calibrado en cada una de las tres parcelas, cambiando las principales variables climáticas: temperatura, precipitación y la concentración de CO_2. Para la temperatura promedio, se aumentó los valores diarios paulatinamente de 5, 10, y 15°C. En la precipitación promedio diaria, se disminuyó los valores con un multiplicador de lluvia en un 20, 50 y 75%. Finalmente, para en el contenido de CO_2, se aumentó a 395, 790 y 1185 ppm. Cada corrida fue independiente.

Escenarios de cambio climático

Para representar posibles escenarios a futuro de la composición atmosférica, las rutas de concentración representativa (RCP) fueron desarrollados para conducir simulaciones de modelos climáticos. Estos se basan en escenarios de emisión de multigases repartidos en 4 escenarios RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5 (Meinshausen *et al.* 2011). El primero se caracteriza por ser el más ambicioso. Al inicio las concentraciones de CO2 aumentan, sin embargo, la curva cae al reducirse sustancialmente con el tiempo la emisión de gases efecto invernadero. El segundo y tercero son escenarios estabilizados para 2100 y se diferencian en la implementación de estrategias y tecnologías para reducir la emisión de gases efecto invernadero. El RCP 8.5 se caracteriza por incrementar los gases efecto invernadero a una valor >1000 ppm para 2100 (Figura 19) y no implementar estrategias.

En este estudio, se usó el RCP 8.5 (Meinshausen *et al.* 2011) con el modelo de circulación global MIROC5 que cuenta con mejoras en la precipitación, oscilaciones del fenómeno niño y niña, campos atmosféricos medias zonales campo de océano subsuperfial ecuatoriales (Watanabe *et al.* 2010) en la parcela de *Terminalia amazonia* con manejo medio convencional.

De la misma forma, se corrió el modelo con concentraciones de CO_2 de 395 ppm aumentando el CO_2 a 541 ppm como predice el RCP 8.5 para 2050 y con los datos climáticos del modelo de circulación global (Meinshausen *et al.* 2011).

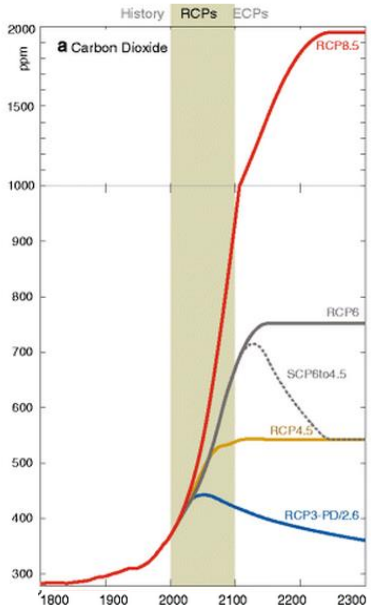

Figura 19. Concentraciones de CO2 atmosférico para cada escenario de emisión
Fuente. (Meinshausen *et al.* 2011)

3.4 Resultados

En el impacto del cambio climático en el cultivo de café, se determinó el efecto individual de cada variable– temperatura, precipitación y el CO_2–, lo cual permitió ver el comportamiento de la planta frente a la modificación de cada una de ellas. Mientras que en la metodología dos, se utilizan los valores combinados de las variables climáticas extraídos por el RCP 8.5 GCM MIROC5 y bajo diferentes concentraciones de CO_2.

3.4.1 Modificación de cada variable climática

Temperatura

Los resultados del impacto de cambio climático en la producción del café con un aumento de temperatura expresa descensos de producción para las tres parcelas.

La temperatura promedio anual en Masatepe con un aumento de 5°C expresa valores entre 23 y 35°C y con un promedio de 29°C como la temperatura máxima óptima e inicio de la temperatura marginal para el cultivo de café (ECOCROP 2000). Con un aumento de 10°C, la temperatura promedio anual es de 34°C con valores entre 28 a 40°C que es el rango marginal según la ecología del cultivo descrita en la base de ECOCROP (2000) y finalmente con un aumento de 15°C la temperatura promedio anual incrementa a 39°C entre 33 a 45°C, siendo un escenario extremo para la planta (Figura 20).

Para Turrialba, la temperatura promedio anual con un aumento de 5°C presenta un promedio de 28°C con una temperatura máxima y mínima entre 21 y 30°C, respectivamente.

Con un aumento de 10°C, la temperatura promedio es de 33°C con valores entre 26 a 33°C y finalmente con un aumento de 15°C la temperatura varía entre 31 a 41°C y con promedio de 38°C.

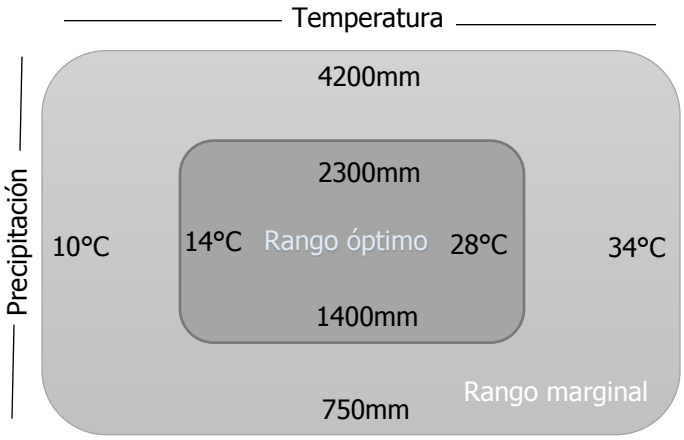

Figura 20. Ecología del cultivo. Rango óptimo y marginal de la precipitación y temperatura para el café arábigo.
Fuente. ECOCROP

En la parcela pleno sol con un manejo medio convencional ubicada en Masatepe, la producción promedio de café baja hasta un máximo de 40% con un aumento de la temperatura promedio anual de 5°C (límite máximo óptimo) con respecto a las condiciones iniciales (sin aumento de temperatura). Bajo aumentos de 10°C (límite marginal) desciende la producción hasta un máximo de 70% y con aumentos de 15°C la producción de la planta es casi nula (Figura 21c).

La respuesta de la producción al incremento de la temperatura promedio anual en la parcela bajo sombra con *Terminalia amazonia* con manejo medio convencional es de un máximo de 18% menos de producción, bajo aumentos de 10°C disminuye un máximo de 26% de producción y con un aumento de 15°C la producción disminuye considerablemente entre un 37% y un 54 % (Figura 21a).

Mientras que en la parcela *Erythrina poeppigiana* con manejo medio convencional, un aumento de 5°C provoca un descenso de producción máxima del 27%. Con aumentos de 10°C, la producción disminuye hasta un 45% y con aumentos de 15°C la producción se reduce más del 52% (Figura 21b).

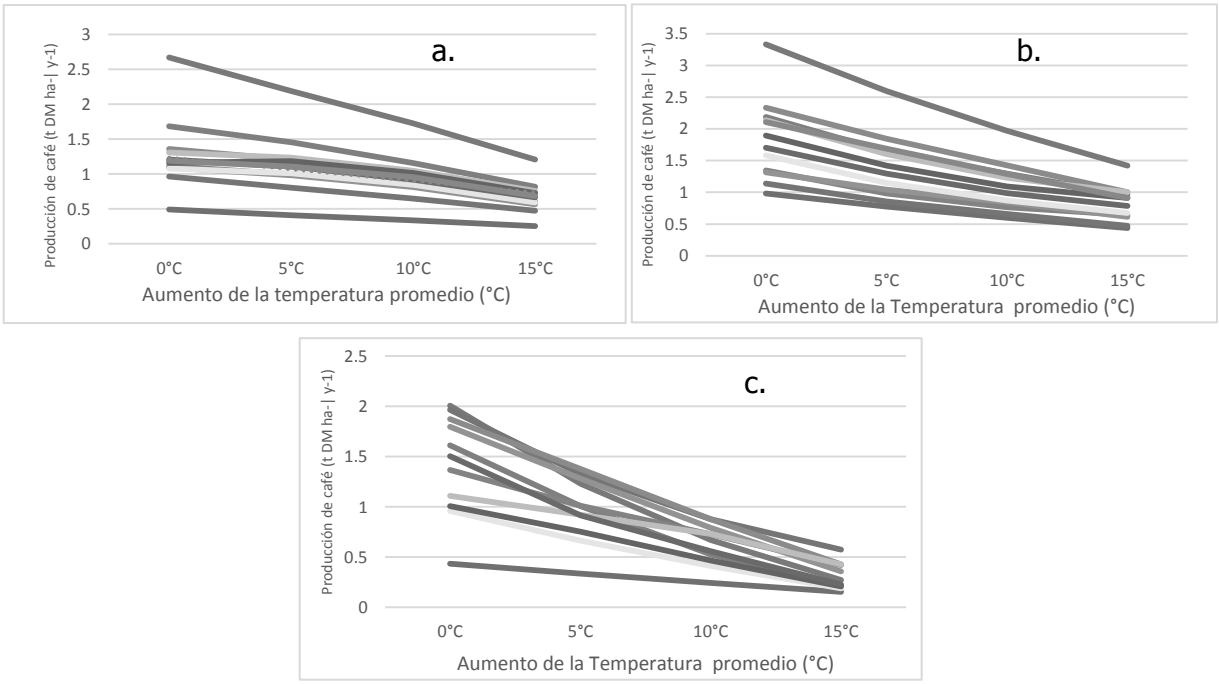

Figura 21. Respuesta de la planta de café al aumento de la temperatura promedio anual en las cosechas 2002 al 2013 para 3 parcelas de Costa Rica y Nicaragua.
a. *Terminalia amazonia* – MC; b. *Erythrina poepiggina* – MC; c. Pleno sol – MC en Masatepe.

Precipitación

La precipitación en Turrialba se caracteriza por presentar valores entre 2679 y 3527 mm promedio anual en los últimos 12 años. El mes más seco tiene un precipitación promedia de 63 mm y el mes más lluvioso tiene 260 mm. Para Masatepe, la precipitación promedio anual varía entre 966 a 2286 mm en los últimos 12 años. El mes más seco presenta una precipitación de 6 mm, mientras que la precipitación del mes más lluvioso tiene 142 mm.

Los rangos óptimos de precipitación anual según ECOCROP varían entre 1400 a 2300 mm y los rangos marginales entre 750 a 4200mm. Esto quiere decir que Masatepe presenta una precipitación promedio anual que se mueve entre el margen inferior óptimo y el margen superior marginal. Caso contrario, Turrialba se mueve dentro del rango superior óptimo y el rango inferior marginal (Figura 22).

Para la variable de precipitación, se disminuyó el valor diario en un 20, 50 y 85%. En el primero, para Masatepe, la precipitación promedio anual disminuye 296 mm, el segundo disminuye 763 mm y para el tercero disminuye 1308 mm. Los primeros dos valores se encuentran dentro del rango marginal y el tercero se sale de este.

Mientras que en Turrialba a 20%, presenta una disminución de precipitación promedio anual de 638 mm, a 65% una disminución de 1988 mm y una disminución de 2589 mm a

85%. A un porcentaje de 20%, la precipitación se mantiene marginal; a 65% la precipitación pasa a ser óptima y para el 85% se sale de los rangos marginales.

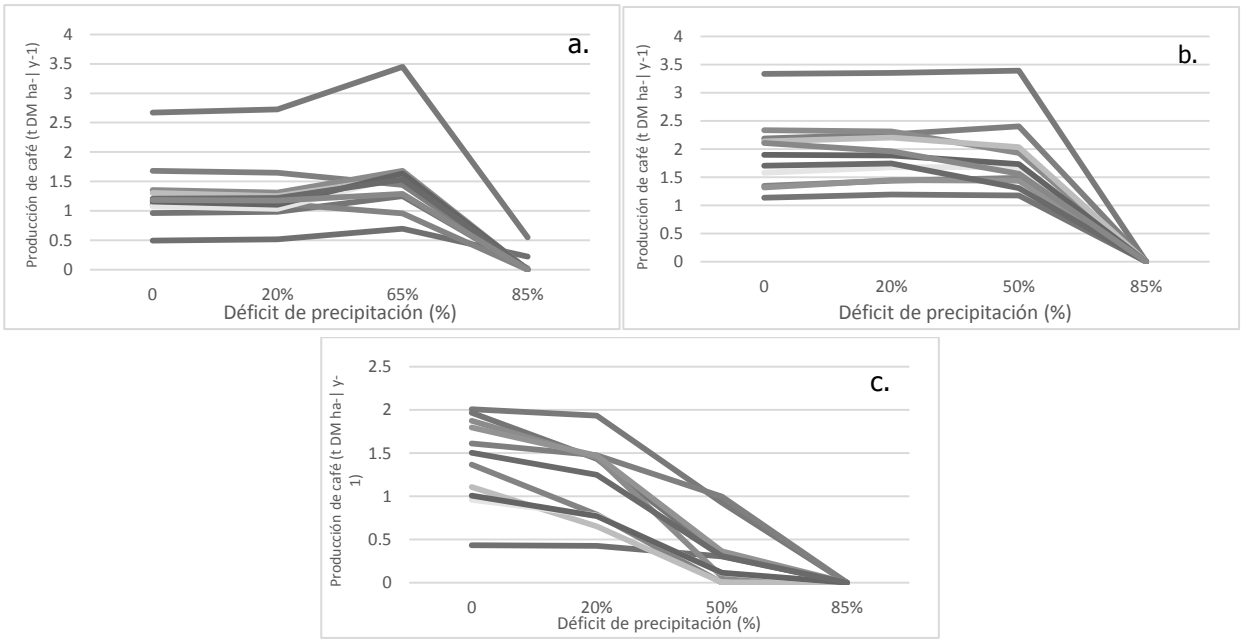

Figura 22. Respuesta de la planta de café a la disminución de la precipitación promedio anual en las cosechas 2002 al 2013 para 3 parcelas de Costa Rica y Nicaragua.
a. *Terminalia amazonia* – MC; b. *Erythrina poepiggina* – MC; c. Pleno sol – MC en Masatepe.

Para las parcelas *Terminalia amazonia* y *Erythrina poepiggiana* con manejo medio convencional una disminución de precipitación promedio anual de 638 mm afecta muy poco la producción de café. Con precipitaciones que disminuyen un 85%, la producción se ve altamente afectada para ambas parcelas siendo nulas. Para *Terminalia amazonia* – MC una disminución de 65% de la precipitación afecta positivamente la producción del café, mientras que en *Eythrina poepiggiana* – MC con un 50% de déficit de agua el aumento en promedio de la producción es bajo casi cero (Figura 22 a y b).

En la parcela de pleno sol con manejo medio convencional al disminuir la precipitación, se reducen los promedios de producción. A 296 mm de déficit de precipitación la producción promedio anual baja un 18%; mientras que para un déficit de 763 mm la producción disminuye en un 76%. Finalmente con un déficit de >1300 mm, la producción promedio anual es nula (Figura 22c).

Aumento de CO2

Se aumentó en los parámetros del modelo las concentraciones de CO_2 en la atmósfera con valores de 395 (actual), 790 y 1185 ppm. Para la parcela de *Terminalia amazonia* con manejo medio convencional con una concentración de CO_2 de 790 ppm en promedio aumenta

un 40% la producción promedia anual y a una concentración de 1185 ppm la producción promedio aumenta 41%.

En la parcela de *Erythrina poeppigiana* con manejo medio convencional a una concentración de CO_2 de 790 ppm la producción aumenta un 9% y a una concentración de 1185 aumenta 11%.

En Masatepe con la parcela pleno sol y un manejo medio convencional, la producción promedio anual aumenta un 47% a una concentración de 790 ppm. Similar con una concentración de 1185 ppm la producción aumenta 54% promedio anual.

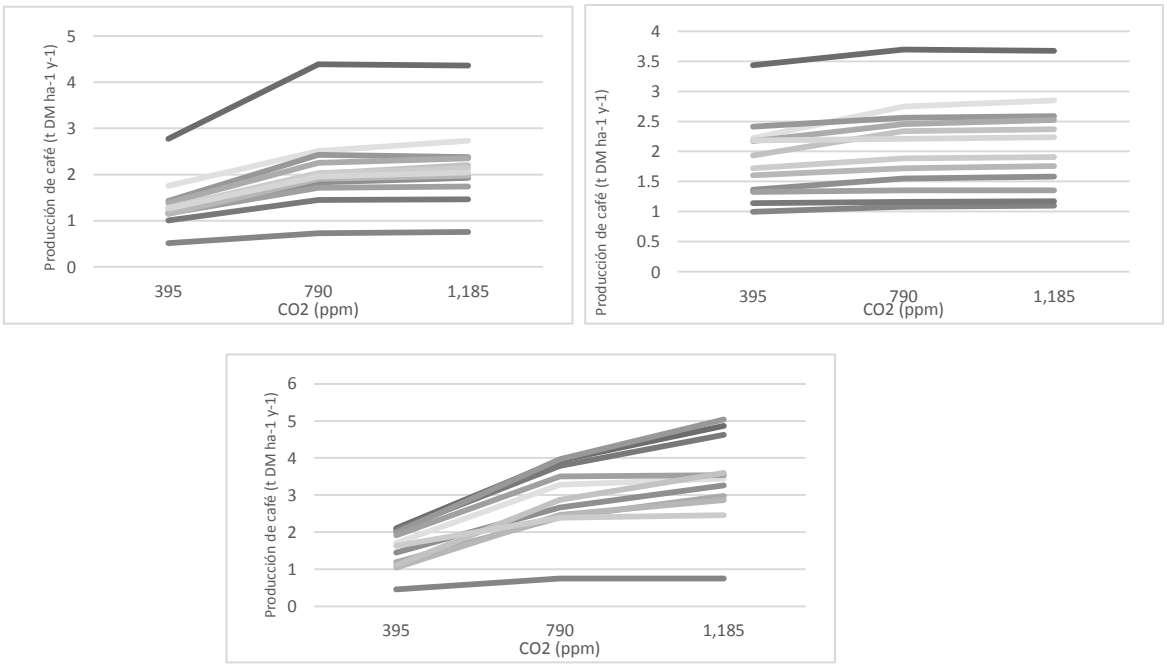

Figura 23. Respuesta de la planta de café al incremento de CO_2 en las cosechas 2002 al 2013 para 3 parcelas de Costa Rica y Nicaragua.
a. *Terminalia amazonia* – MC; b. *Erythrina poepiggina* – MC; c. Pleno sol – MC en Masatepe.

3.4.2 Escenarios de cambio climático

Se realizó la simulación con el modelo CAF2007 calibrado por multisitio determinado en el capítulo 1. Se cambió las variables climáticas diarias bajo el RCP8.6 y el modelo de circulación global MIROC5. Estos nuevos modelos tienen los datos diarios y no es necesario utilizar otros programas para convertirlos. Se realizó la simulación para una serie de tiempo de 14 años desde el 2040 a 2054 y se cambiaron las concentraciones de CO_2 de la atmósfera. Se utilizó los datos de manejo de la parcela *Terminalia amazonia* con manejo medio convencional, así como el árbol de sombra, densidad y condiciones sitio.

El clima del escenario MIROC5 se caracteriza por aumentar la temperatura máxima 1°C y aumentar la temperatura mínima 8°C. La precipitación acumulada anual disminuye 1000 mm y aumentan los vientos, la radiación solar y la presión de vapor.

Incrementos de las concentraciones de CO_2 atmosférico como muestra la Figura 21 evidencia aumentos de las producciones promedio anual para la parcela *Terminalia amazonia*

con manejo medio convencional. Las producciones con los datos climáticos de MIROC5 y concentraciones de CO_2 de 380 ppm disminuyen en promedio 18%; pero si se aumenta el CO_2 a 541 ppm, la producción incrementa un 10% (Figura 25).

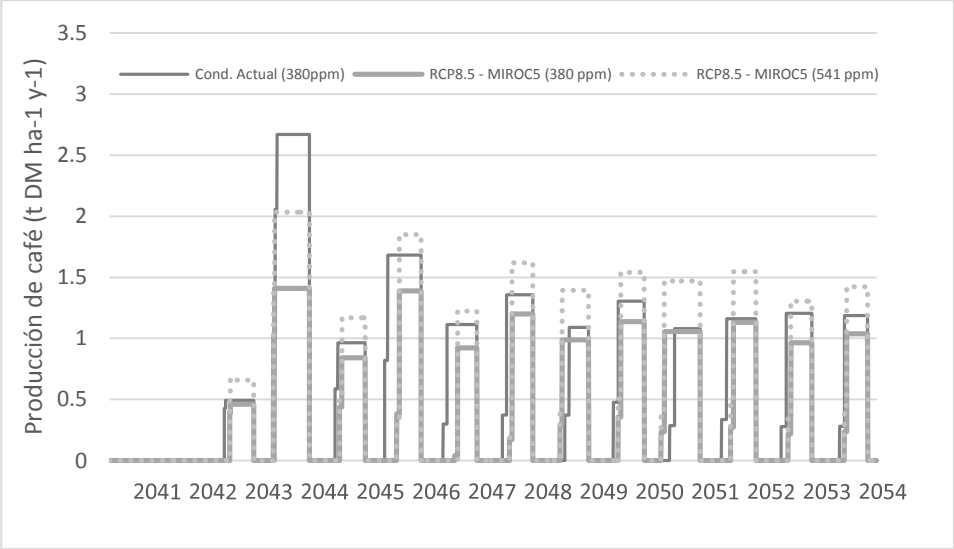

Figura 24. Producción promedio anual bajo diferentes concentraciones de CO_2 en la atmósfera para *Terminalia amazonia* - MC en Turrialba.

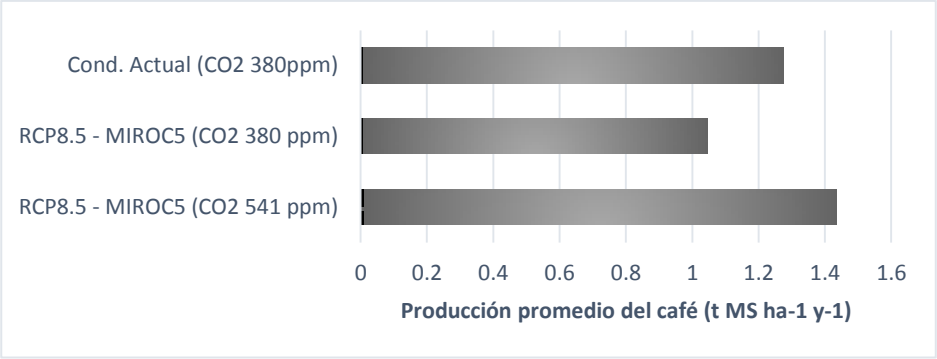

Figura 25. Producción promedio anual de las cosechas 2040-2054 para *Terminalia amazonia* MC en Turrialba

3.5 Discusiones

Aumentos de la temperatura promedio anual en el rango máximo óptimo para el café (+5°C) reducen considerablemente la producción máxima en un 40% para parcelas a pleno Sol y entre 18 y 27% para parcelas con árboles de sombra, *Terminalia amazonia* y *Erythrina poeppigiana*, respectivamente. Estas reducciones de producción según Damatta (2004) se pueden deber a altas temperaturas en la fase de floración y provocar aborto de las flores asociado principalmente a una estación seca como es el caso de Masatepe (con los mayores porcentajes de pérdida de producción) y continuas exposiciones a altas temperaturas mayores de 30°C.

La reducción de la producción es mucho menor en parcelas con *Terminalia amazonia* y *Erythrina poepiggiana* con manejo medio convencional que en la parcela de pleno sol en

Masatepe, ya que se cuenta con un árbol de sombra. Según Muschler (1997), los sistemas agroforestales pueden amortiguar los efectos de clima bajo condiciones subóptimas siempre que no haya una competencia por los nutrientes y agua entre las especies. *Erythrina poepiggiana* es más afectada por el aumento de temperatura que *Terminalia amazonia,* ya que presenta un 10% menos de área de sombra.

Esto se debe a que, con un aumento de temperatura de 5°C, la parcela *Terminalia amazonia* MC puede disminuir la temperatura del cafetal en promedio de 2.14°C con un área de sombra del 50%; mientras que para *Erythrina poepiggiana* MC puede disminuir 0.67°C con una sombra de 33%.

Temperaturas altas disturban el metabolismo de la planta (Damatta y Ramalho 2006b). Los cierres de los estomas afectan negativamente la tasa de fotosíntesis neta y una continua exposición a alta radiación solar puede causar daños en el aparato fotosintético aún en plantas adaptadas a plena exposición solar (Arcila 2007).

En pleno sol – MC con aumentos de temperatura de 15°C, la temperatura supera valores de 38°C afectando la fotosíntesis neta que se reduce marcadamente casi llegando a valores de cero. Según Damatta (2004), las tasas de temperatura pueden ser altas cuando están bajo un árbol de sombra. Varios autores contradicen cuál es la temperatura máxima para que la fotosíntesis neta sea nula, esto depende de las condiciones del sitio, el manejo del cultivo y la interacción con las condiciones climáticas.

Por tal, el uso de árboles bajo condiciones de baja altitud y temperaturas más cálidas se vuelve prometedor (Damatta 2004) para reducir el efecto del incremento de temperatura en el cultivo de café. Ya que las temperatura máximas son reducidas en 5.4°C en promedio y son aumentadas en 1.5°C para temperaturas mínimas (Siles y Vaast 2002).

Los requerimientos de precipitación dependen de las propiedades de retención del suelo, humedad de la atmósfera y la cobertura por las nubes así como también el manejo que se le da al cultivo (Damatta y Ramalho 2006a). La distribución y cantidad de precipitación afecta directamente la floración, producción y la época de maduración del grano por los cual se ve marcado en las parcelas del ensayo en Masatepe con la época seca y de lluvia y menos predecible en Turrialba.

La precipitación promedio anual de Turrialba se encuentra dentro de los valores superiores óptimos y superiores marginales, por lo cual al disminuir la precipitación en un 20% y 50 % no afecta la producción al contrario se ajusta a los valores óptimos y en el caso de *Terminalia amazonia* con manejo medio convencional incrementa la producción promedio anual. Un déficit de precipitación alta y que sobrepasa los rangos marginales conlleva a producciones en promedio nulas.

La precipitación en Masatepe se encuentra dentro de los rangos óptimos a marginales bajos y al disminuir las precipitaciones repercute directamente en la producción (pérdida de 76%) con déficit de 763 mm promedio anual.

Aumentar las concentraciones de CO_2 en la atmósfera afecta los procesos fundamentales en la planta y tal vez altera el crecimiento de planta, la calidad y los rendimientos

agronómicos (Ramalho *et al.* 2013). El aumento de CO_2 puede al mismo tiempo provocar un aumento del uso eficiente del agua y Nitrógeno y disminuir las concentraciones y nutrientes de las hojas (Ramalho *et al.* 2013). Martins *et al.* (2014) Encontraron que el CO_2 cambia moderadamente las concentraciones de algunos minerales y que se mueven a través de un rango adecuado para el cultivo de café.

Según los resultados del incremento de CO_2,la producción promedio anual aumenta en casi un 40% en las parcelas de *Terminalia amazonia* y pleno sol con manejo medio convencional. Según Amthor (2001) un incremento en CO_2 estimula la fotosíntesis e inhibe la foto respiración en las plantas C3. Este efecto se conoce comúnmente como efecto de fertilización de CO_2.

Las producciones de *Terminalia amazonia* – MC utilizando el modelo calibrado por multisitio y bajo las variables de clima del modelo MIROC5 y RCP8.5 muestran que las producciones promedios anuales bajan si no se aumenta el CO_2. Las condiciones de clima como se describe en la metodología anterior afectan el desarrollo del cultivo. La precipitación promedio anual disminuye 1000 mm y el promedio de temperatura anual aumenta 5°C así como aumentos de la radiación solar, velocidad del viento y presión de vapor. Sin embargo, al incrementar las concentraciones de CO_2, las producciones promedio anual acrecientan un 10%; esto se debe, como se explicó, anteriormente al efecto de la fertilización de CO_2.

El efecto del CO_2 en la planta de café no ha sido fuertemente estudiado y hay algunas incógnitas de cómo afecta la planta. Sin embargo, muchos concuerdan en que la fertilización de CO_2 afecta los procesos de fotosíntesis. El café utiliza la enzima rubisco para fijar CO_2; sin embargo, cada apertura estomática también produce pérdida de agua. Si el aumento de la producción de biomasa es mayor que la pérdida por transpiración se dice que se mejoró la eficiencia del agua, un fenómeno comúnmente observado en condiciones de concentración de CO_2 elevados.

3.5 Conclusiones

Un aumento de la temperatura promedio anual de 5°C afecta las producciones promedio anual de las parcelas a pleno sol que las parcelas con árboles de sombra. Para las parcelas con sombra, la producción promedio anual puede variar dependiendo de la especie de árbol y el área de sombra.

En las parcelas simuladas con árboles, el porcentaje de sombra influye directamente en el cambio de temperatura del cafetal; por lo tanto así mismo será la reducción de la producción por el efecto del aumento de la temperatura.

El tipo de árbol, la densidad y manejo de copa son fundamentales para reducir el efecto del aumento de la temperatura sobre la producción promedio anual de café.

Menores precipitaciones afectan negativa o positivamente la producción promedio anual de la planta de café dependiendo de las condiciones de cada sitio y la cantidad de milímetros disminuidos. La parcela a pleno sol con manejo medio convencional en Masatepe se caracteriza por presentar un clima seco-cálido en el cual reducciones de precipitación

(763mm) afectan un 76% la producción promedio anual. Caso contrario ocurre en Turrialba que tiene precipitaciones superiores a las óptimas y en el cual una disminución de precipitación puede afectar positivamente a la producción; sin embargo, al reducir grandes cantidades (>2500mm) disminuye la producción en un 85%.

El aumento de CO_2 en la planta de café tiene un efecto de fertilización aumentando las producciones promedio anual en las parcelas de estudio. Esto puede deberse al uso eficiente del agua en la planta sin embargo se desconoce en la actualidad otros efectos que pueda tener este aumento en los procesos de la planta.

En la parcela de estudio (*Terminalia amazonia* MC) utilizando el modelo de circulación global MIROC5 bajo un RCP 8.5 y una concentración de CO_2 de 380 ppm, la planta de café disminuye (18%) la producción promedio anual y aumenta hasta un 10% con un aumento de CO_2 de 541 ppm.

Hay que tener cuenta que el modelo CAF2007 dentro de sus procesos no incluye otras limitaciones que pueden afectar la producción de café como es el efecto de las plagas y enfermedades y sus organismo benéficos, no tiene la función de modelar el CO_2 a través del tiempo ni las interacciones que puede tener sobre otras partes de la planta, ya que aún no se reportan estudios a largo plazo sobre el efecto del CO_2 en la ecofisiología de la planta.

3.6 Literatura citada

Alegre, C. 1959. Climates et cafeiers d'Arabie. Agronomie Tropicale. (14): 24-48.

Amthor, J.S. 2001. Effects of atmospheric CO2 concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO2 concentration. Field Crops Research. 73(1): 1-34. Disponible en http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429001001794 http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00179-4

Arcila, J. 2007. Factores que determinan la productividad del cafetal. *In* Arcila Pulgarin, J.; Farfán, F.; Moreno, A.; Salazar, L.; Hincapie, E. eds. 2007. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Colombia, Federación Nacional de Cafeteros - Cenicafé. p. 309.

DaMatta, F.M. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. Field Crops Research. 86(2–3): 99-114. Disponible en http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429003001977 http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001

DaMatta, F.M.; Ramalho, J.D.C. 2006a. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. Brazilian Journal of Plant Physiology. 18(1): 55-81.

DaMatta, F.M.; Ramalho, J.D.C. 2006b. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. Brazilian Journal of Plant Physiology. 18: 55-81. Disponible en http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-04202006000100006&nrm=iso

ECOCROP (Food And Agriculture Organization of the United Nations, US). 2000. Coffea arabica: Ecology. Disponible en http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/dataSheet?id=749

Franco, C.M. 1958. Influence of temperature on growth of coffee plant, IBEC Research Institute, sd.

Läderach, P.; Schepp, K.; Ramírez, J.; Jarvis, A.; Eitzinger, A. 2010. Impacto del cambio climático para el cultivo de café en Nicaragua. *In*. 2010. Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina. Publicación CATIE 99, Turialba, Costa Rica: Centro Tropical Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. p. 54.

Lambers, H.; Chapin III, F.S.; Pons, T.L. 2008. Plant Physiological Ecology, Springer New York. 604 p. (Second edition). 10.1007/978-0-387-78341-3

Martins, L.; Tomaz, M.; Lidon, F.; DaMatta, F.; Ramalho, J. 2014. Combined effects of elevated [CO2] and high temperature on leaf mineral balance in Coffea spp. plants. Climatic Change. 126(3-4): 365-379. Disponible en http://dx.doi.org/10.1007/s10584-014-1236-7 10.1007/s10584-014-1236-7

Meinshausen, M.; Smith, S.J.; Calvin, K.; Daniel, J.S.; Kainuma, M.; Lamarque, J.; Matsumoto, K.; Montzka, S.; Raper, S.; Riahi, K. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Climatic Change. 109(1-2): 213-241.

Muschler, R. 1997. Shade or sun for ecologically sustainable coffee production: a summary of environmental key factors. III Semana Científica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba. 109-112.

Ramalho, J.C.; Rodrigues, A.P.; Semedo, J.N.; Pais, I.P.; Martins, L.D.; Simões-Costa, M.C.; Leitão, A.E.; Fortunato, A.S.; Batista-Santos, P.; Palos, I.M. 2013. Sustained Photosynthetic Performance of Coffea spp. under Long-Term Enhanced [CO2]. PLoS ONE. 8(12): e82712.

Schroth, G.; Läderach, P.; Dempewolf, J.; Philpott, S.; Haggar, J.; Eakin, H.; Castillejos, T.; Moreno, J.G.; Pinto, L.S.; Hernández, R. 2009. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 14(7): 605-625.

Siles, P.; Vaast, P. 2002. Comportamiento fisiológico del café asociado con Eucalyptus deglupta, Terminalia ivorensis o sin sombra. Agroforestería en las Américas. 9: 44-49.

Suárez Serrato, J. 1979. Influencia de la precipitación en el crecimiento del fruto del café [Coffea arabica]. Avances Técnicos Cenicafé (Colombia). (89): 1-4.

Watanabe, M.; Suzuki, T.; O'ishi, R.; Komuro, Y.; Watanabe, S.; Emori, S.; Takemura, T.; Chikira, M.; Ogura, T.; Sekiguchi, M.; Takata, K.; Yamazaki, D.; Yokohata, T.; Nozawa, T.; Hasumi, H.; Tatebe, H.; Kimoto, M. 2010. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. Journal of Climate. 23(23): 6312-6335. Consultado 2014/11/26. Disponible en http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1 10.1175/2010JCLI3679.1

White, J.W.; Hoogenboom, G.; Kimball, B.A.; Wall, G.W. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. Field Crops Research. 124(3): 357-368.

ANEXO 1

	Parámetro	Identificador	Unidades	Mínimo	Promedio	Máximo
Árbol	CBtree0	Biomasa inicial en ramas	kg C m^{-2}	0.005	0.01	0.2
	CLtree0	Biomasa inicial en hojas	kg C m^{-2}	0.0025	0.005	0.1
	CRtree0	Biomasa inicial en raíces	kg C m^{-2}	0.01	0.02	0.4
	CStree0	Biomasa inicial en tronco	kg C m^{-2}	0.005	0.01	0.2
	BETA	Factor de crecimiento biótico	-	0.25	0.5	1
	FB	Asignación de carbono para ramas	kg C kg^{-1}	0.15	0.23	0.6
	FLMAX	Máxima asignación de carbono para hojas	kg C kg^{-1}	0.15	0.3	0.6
	FNCLMINT	Tasa N/C in hojas (mínima)	kg N kg^{-1} C	0.34	0.68	1.36
	FS	Asignación de carbono para tronco	kg C kg^{-1}	0.14	0.28	0.56
	FTCCLMINT	Fracción mínima de vida del carbono en hojas	-	0.45	0.9	1.8
	GAMMA	Tasa respiración/fotosíntesis	kg kg^{-1}	0.275	0.55	1.1
	KAC	Constante alométrica que vincula la biomasa -C- de las ramas con el área de copa.	m^2	10	30	40
	KACEXP	Constante alométrica que vincula la biomasa -C- de las ramas con el área de copa.	-	0.1	0.6	1.1
	KEXTT	Coeficiente de extinción de luz	m^2 m^{-2}	0.35	0.7	1.4
	KH	Constante alométrica que vincula la biomasa -C- de las ramas con la altura.	m	1	5	8
	KHEXP	Constante alométrica que vincula la biomasa -C- de las ramas con la altura.	-	0.1	0.35	0.45
	KNMINT	Captación N: Capacidad mínimo de N captado	kg N m^{-2}	0.0041	0.0082	0.0164
	KNUPTT	Captación N: Tasa de N captado	kg N m^{-2} d^{-1}	0.00065	0.0013	0.0026
	LAIMAXT	Máximo índice de área foliar	m^2 m^{-2}	2.8	5.6	11.2
	LUEMAX	Uso eficiente de luz	kg C MJ^{-1} PAR	0.00044	0.00087	0.00174
	NCLMAXT	Tasa N/C en hojas (máximo)	kg N kg^{-1} C	0.05	0.1	0.2
	NCRT	Tasa N/C de raíces	kg N kg^{-1} C	0.021	0.042	0.084
	NCWT	Tasa N/C en ramas y tronco.	kg N kg^{-1} C	0.0034	0.0068	0.0136
	SLAT	Área específica de la hoja	m^2 kg^{-1} C	19.41	38.82	77.64
	TCCBT	Tiempo de vida del C en ramas	d	1000	2000	4000
	TCCLMAXT	Máximo tiempo de vida del C en la hojas	d	400	800	1600
	TCCRT	Tiempo de vida del C en las raíces.	d	2400	4800	9600
	TOPTT	Temperatura óptima para la asimilación de C	°C	11	22	44
	TRANCOT	Coeficiente de transpiración	-	4	8	16
	TTOLT	Temperatura total para asimilación de C.	°C	5	10	20
Sitio, suelo, atmósfera y manejo	FLITTSOMF	Eficiencia de transformación de la hojarasca	kg kg^{-1}	0.375	0.75	1.5
	FSOMFSOMS	Eficiencia de transformación de la materia orgánica.	kg kg^{-1}	0.015	0.045	0.07
	FWCAD	Fracción del contenido de agua a sequedad del aire	-	0.004	0.01	0.02
	FWCFC	Fracción del contenido de agua a capacidad de campo	-	0.45	0.8	0.9
	FWCWET	Fracción del contenido del agua a saturación de agua	-	0.2	0.8	1.2
	FWCWP	Fracción del contenido de agua a punto de marchitez	-	0.205	0.28	0.45
	KNEMIT	Constante de la tasa de emisión de N del suelo a capacidad de campo	kg N kg^{-1} N d^{-1}	0.0003	0.0006	0.0012
	RNLEACH	Tasa de NMIN en drenaje para el suelo mayor	kg N kg^{-1} N	0.5	1	2
	ROOTD	Profundidad de la raíz.	m	0.5	1	2
	TCLITT	Tiempo constante de descomposición de la hojarasca	d	250	500	750
	TCSOMF	Tiempo constante de descomposición de la materia orgánica inestable	d	3750	7500	15000
	TCSOMS	Tiempo constante de descomposición de la materia orgánica estable	d	12500	25000	50000
	WCST	Contenido de agua a saturación.	m^3 m^{-3}	0.4	0.6	0.7
	CNSOMS0	Tasa inicial de C/N estable en la materia orgánica	kg C kg^{-1} N	8	20	30
	CNSOMF0	Tasa inicial de C/N inestable en la materia orgánica	kg C kg^{-1} N	8	18	30
	FCSOMF0	Fracción inicial de la materia orgánica que es inestable	-	0.4	0.6	0.8

	Parámetro	Identificador	Unidades	Valor mínimo	Valor promedio	Valor máximo
Café	KSINKPPAR	Parámetro para calcular la fuerza de sumidero de los órganos de almacenamiento.	m^2 d MJ^{-1}	0.275	0.8	1
	FNCLMIN	Límite inferior de la tasa de N/C en hojas expresado como la fracción del máximo.	-	0.5	0.64	0.9
	FSLAMIN	Límite inferior de la tasa de SLA en hojas expresado como la fracción del máximo.	-	0.55	0.68	0.8
	FTCCLMIN	Límite inferior del rango de vida útil de las hojas expresada como la fracción del máximo.	-	0.5	0.64	0.8
	KEXT	Coeficiente de extinción de luz	m^2 m^{-2}	0.2	0.76	1.1
	KNMIN	Km para captación de N.	kg N m^{-2}	0.0036	0.1	0.36
	KNUPT	Vmax para captación de N.	kg N m^{-2} d^{-1}	0.0002	0.005	0.02
	KRAININT	Capacidad de intercepción de lluvia.	mm	0.125	0.25	0.5
	NCLMAX	Tasa N/C en hojas (máximo)	kg N kg^{-1} C	0.02	0.06	0.1
	NCP	Tasa N/C en órganos de almacenamiento.	kg N kg^{-1} C	0.0165	0.03	0.066
	NCR	Tasa N/C en raíces.	kg N kg^{-1} C	0.005	0.045	0.1
	NCW	Tasa N/C en ramas y tronco.	kg N kg^{-1} C	0.003	0.006	0.012
	RUBISC	Contenido de Rubisco.	g m^{-2}	0.3	2	6
	SINKL	Fuerza de sumidero en hojas.	-	0.3	2	10
	SINKPMAX	Fuerza de sumidero en órganos de almacenamiento.	-	15	40	70
	SINKR	Fuerza de sumidero en raíces.	-	8	14	25
	SLAMAX	Área máxima específica de la hoja.	m^2 kg^{-1} C	25	28	35
	TCCR	Promedio de vida útil de las raíces.	d	800	8000	10000
	TMATB	Temperatura base para maduración.	C	5	10	15
	TMATT	Tiempo termal para maduración.	C	2300	2780	3300
	TRANCO	Coeficiente de transpiración.	mm d^{-1}	2	6.7	10
	YG	Eficiencia de crecimiento.	kg C kg^{-1} C	0.3	0.4	0.8
	FSINKPMAX0	Tasa máxima de fuerza en los órganos de almacenamiento.	-	0	0.35	0.8
	KSINKPMAX	Coeficiente máximo de fuerza en los órganos de almacenamiento.	-	0	0.8	1