

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS DE DISTRIBUCIÓN DE CACAO EN LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS PRESENTES Y FUTURAS EN NICARAGUA MEDIANTE MAXENT

Autor: Armando Isaac Martínez Valle

Director: Dr. Alberto García Martín

Máster Universitario en

Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección

Agosto de 2012



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Agradecimientos

A Dios

Que en su inmensa sabiduría ha sabido guiarme para sortear incontables problemas, aún a pesar de mi rebeldía inherente.

A mi familia

A mi esposa Claudia María y mi hija Gabriela Isamar, por brindarme su apoyo y cariño. Por ser mi inspiración para dar siempre pasos hacia adelante, sin ellas nada de esto sería posible.

A mis maestros

En especial a los profesores Alberto García Martín y Juan de la Riva, por su esmero y dedicación para compartir sus conocimientos en las nuevas artes de esta ciencia de las TIG.

Resumen

Este trabajo examina el uso de un modelo de distribución de especies para determinar las áreas actuales y futuras para la producción de cacao en Nicaragua. La metodología usada incluye: (i) la obtención y preparación de las variables que definen el clima actual de Nicaragua; (ii) el modelado de algunas de estas variables climáticas para el año 2050 utilizando 19 modelos de circulación global(GCM); (iii) la recopilación de datos de presencia de la especie estudiada y su revisión con el apoyo de instituciones locales implicadas en el cultivo de la especie estudiada; (iv) la aplicación y validación del modelo de distribución de especies de Máxima Entropía (MaxEnt) con diferentes conjuntos de variables climáticas actuales; (v) la aplicación de MaxEnt para las condiciones climáticas futuras en función de los resultados obtenidos en la situación actual; (vi) el cálculo de medidas de incertidumbre para evaluar las diferencias entre los modelos a futuro obtenidos y, finalmente, (vii) un estudio sobre la interrelación espacial en el horizonte 2050 de una zona potencialmente productora de cacao y café.

Los resultados obtenidos en las pruebas seleccionadas para validar los modelos, el estadístico Chi-cuadrado, indican que los modelos obtenidos con los tres conjuntos de variables climáticas son adecuados para predecir o estimar la presencia de la especie modelada, obteniéndose además un p-valor inferior a 0,001, lo que muestra la significación estadística de todos ellos. En cuanto a la valoración de la sensibilidad para determinar la presencia del cultivo de cacao, el conjunto de variables Bio Prec + ETP presenta los mejores resultados al momento de predecir las áreas de distribución del cultivo para condiciones climáticas actuales. En cuanto a la incertidumbre de las estimaciones para el horizonte 2050, el coeficiente de variación calculado para los 19 GCM revela que es escasa, dado que se sitúa en un rango del 10 – 20%. Este hecho es confirmado mediante el cálculo de una medida de similitud, la cual muestra que los cambios se producen en una misma dirección, mostrándose además una alta concordancia. Los hallazgos muestran que en comparación con las áreas de distribuciones actuales, podría haber un incremento en la aptitud general de Nicaragua en el cultivo del cacao para el año 2050. Por último señalar que en la zona donde actualmente hay coincidencia en la aptitud climática tanto para cacao como para café, se estima que para condiciones futuras el café pierde aptitud mientras que el cacao se mantiene sin cambios.

Palabras Clave: Modelos de distribución de especies, Cambio Climático, cacao, Nicaragua.

Abstract

This dissertation examines the use of a species distribution model to determine the current and future cocoa growing-areas in Nicaragua. The used methodology includes: (i) obtaining and preparing variables that defines the current climate of Nicaragua; (ii) modeling some of these climate variables by 2050 year using 19 GCM (Global Circulation Models); (iii) collecting presence data for studied specie and reviewing of these data with the support of local institutions involved in growing of the studied specie; (iv) applying and evaluating of MaxEnt species distribution model with different sets of current climate variables; (v) applying MaxEnt for future climate conditions according on the results obtained in the current situation; (vi) calculation of uncertainty measures to evaluate differences between future models obtained and, finally, (vii) a study on the spatial interrelation in 2050 horizon of a potential growing-area for cocoa and coffee.

The obtained results in the selected tests for model validation, the Chi-square statistic indicate that the obtained models with three sets of climate variables are appropriate to predict or estimate the presence of the modeled specie , obtaining a p-value lower than 0,001, which shows the statistical significance in all of them. Regarding the sensibility valuation to determine the cocoa presence, the set of variables called "Bio Prec + ETP" shows the better results to predict the distribution areas of crop for current climate conditions. Respect of measure the uncertainty of estimation for horizon 2050, the variance coefficient (CV) calculated for the 19 GCMs reveals that is low, since it is located in a range between 10 – 20%. This fact is confirmed through a measure of agreement calculation, which shows that changes occurs in a same direction, with a high concordance. The findings show that in comparison with the current distribution areas for cocoa crop, could be an increase of suitability by 2050. Finally, in the zone where there is a coincidence in the climatic suitability for both cocoa and coffee, it is estimated that for future conditions, coffee lose suitability while cocoa remains unchanged.

Key Words: Species distribution models, Climate Change, cocoa, Nicaragua.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación del trabajo	1
1.2. Estado de la cuestión	2
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Metodología aplicada	3
1.4.1. Obtención de los datos de clima actual y otras variables derivadas.....	3
1.4.1.2. Variables bioclimáticas	3
1.4.1.3. Variables de evapotranspiración potencial	4
1.4.2. Obtención de los datos de clima futuro.....	5
1.4.3. Registros de presencia del cultivo	6
1.4.4. Aplicación del modelo de distribución de especies MaxEnt	7
1.4.4.1 El modelo de distribución de especies MaxEnt.....	7
1.4.4.2. Interpretación de los resultados de MaxEnt: los rangos de aptitud climática	8
1.4.4.3. Agrupación de las variables climáticas consideradas	8
1.4.4.4. Validación de los resultados obtenidos con los datos de clima actual y aplicación del modelo para el horizonte 2050	9
1.4.4.5. Medidas de evaluación de la incertidumbre para los modelos de distribución generados para el horizonte 2050.	10
1.4.4.6. Factores ambientales que determinan el cambio de aptitud	12
1.4.5. Análisis de los resultados en el horizonte 2050 para determinar la interrelación espacial de las zonas de distribución para cacao y café.	12
2. DESARROLLO ANALÍTICO	14
2.1 Condiciones climáticas actuales y futuras	14
2.2 Áreas de distribución del cultivo del cacao. Estimaciones para condiciones actuales.	16
2.3 Áreas de distribución del cultivo del cacao para condiciones en el año 2050. ...	17
2.4 Variables que determinan el cambio de aptitud del cultivo del cacao para 2050.	19
2.5 Resultados de las medidas de incertidumbre.....	21
2.5.1 Coeficiente de variación	21
2.5.2 Medida de similitud entre los modelos	22
2.6 Análisis de la interrelación espacial entre las zonas de distribución para cacao y café en el año 2050.	22
3. CONCLUSIONES	26
4. BIBLIOGRAFÍA	28
ANEXOS	32
Anexo I: Listado de participantes en reunión de trabajo para validación.	32

INTRODUCCIÓN

Para la obtención del título de “Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección” impartido en el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza es de obligatorio cumplimiento presentar un proyecto fin de máster para demostrar en la práctica los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del mencionado máster.

Por tal motivo, se presenta este trabajo, el cuál ha sido desarrollado en el marco de un estudio desarrollado en el Centro Internacional para la Agricultura Tropical (CIAT) y con la colaboración de varios actores locales en Nicaragua como: CRS (*Catholic Relief Services*, Servicios de Auxilio Católico), LWR (*Lutheran World Relief*, Auxilio Mundial Luterano) y GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*, Agencia Alemana de Cooperación Técnica). El objetivo principal en este estudio ha sido estimar el impacto del cambio climático sobre la aptitud del cultivo de cacao en las principales zonas productoras de Nicaragua.

Nicaragua es un país que depende del sector agropecuario. Las actividades económicas de este sector aportan cerca de un 20% al PIB (BCN, 2008). La alta dependencia del país y de las poblaciones rurales a la producción agrícola y la alta vulnerabilidad del sector ante el cambio y variabilidad climática, hacen necesaria la realización de estudios para determinar el nivel de exposición las áreas de producción (Gutiérrez y Zamora, 2010). De ahí que la aplicación de herramientas de análisis espacial cobren tanta importancia para generar información vital para los tomadores de decisiones.

Este proyecto fin de máster constituye un esfuerzo por aplicar algunas técnicas de análisis espacial para determinar el posible impacto del cambio climático sobre un cultivo específico. Al mismo tiempo, es un intento por describir una metodología basada en el uso de un modelo de distribución de especies genérico a un caso concreto de vital importancia para la economía nicaragüense, constituyéndose en un primera aproximación para abrir el debate sobre estos modelos en cuestiones agrícolas en Nicaragua, así como la necesaria mejora de las aplicaciones destinadas a generar información espacial de precisión que sea la base para la toma de decisiones adecuadas por parte de los gestores públicos.

El documento se organiza en tres capítulos principales:

- **Introducción:** en este acápite se presentan los objetivos del estudio y se describe la metodología utilizada.
- **Desarrollo analítico:** se desarrolla la metodología aplicada y se presentan los resultados obtenidos para las condiciones climáticas actuales y futuras, identificándose las variables que podrían inducir a un cambio de aptitud para los cultivos de cacao. Además, se incluye el cálculo de algunas medidas de incertidumbre sobre los modelos de distribución calculados para el futuro. Finalmente, se analiza en ese escenario futuro las interrelaciones existentes entre los cultivos de cacao y café en una zona donde actualmente conviven ambos.
- **Conclusiones:** se resumen los principales hallazgos y consideraciones según los objetivos propuestos en el estudio

1.1. Justificación del trabajo

El cacao es un cultivo de gran importancia socioeconómica para muchos países tropicales. Durante el ciclo 2009/2010 la producción mundial de cacao alcanzó los 3.6 millones de toneladas, siendo África la principal región productora del mundo con el 68% de la producción, mientras que América aporta un 14% de la producción mundial (ICCO, 2011). En el caso específico de Nicaragua, en el año 2011 las exportaciones alcanzaron 1.856 toneladas con un valor FOB (Free On Board. Libre a Bordo) de 2,8 Mi US\$, lo que supuso una variación de -0.02% en toneladas y -0.11 en valor FOB con respecto al año anterior (CETREX, 2012). Se estima que la producción nacional de cacao está en manos de 8,000 productores localizados principalmente en: la RAAS (Región Autónoma Atlántico Sur), la RA-

AN (Región Autónoma Atlántico Norte) y en los departamentos de Matagalpa, Jinotega, Río San Juan, Granada y Rivas (ver Figura 1), ascendiendo el volumen de familias que se dedican a labores del cultivo a 5.843, estando el 60% de éstas asociado a alguna organización (Escobedo, 2010). Estas cifras muestran que el cacao es un cultivo muy importante para Nicaragua en la actualidad, siendo también muy importante su valor histórico tal y como señala el hecho de que en la época precolombina fuera usado como moneda (Cuadra, 1963).

Investigaciones recientes demuestran que diferentes cultivos en muchas partes del mundo serán afectados por el cambio climático, lo que ocasionará importantes impactos sobre el abastecimiento de alimentos (Lobell *et al.*, 2008; Läderach *et al.*, 2010b) e, igualmente, sobre una gran cantidad de ecosistemas (Schroth *et al.*, 2009). En este contexto, se ha indicado específicamente el impacto progresivo sobre la producción de café, los medios de vida de los productores y los impactos sobre los servicios ambientales inherentes a los sistemas agroforestales de la región mesoamericana (Läderach *et al.*, 2010).

Considerando la importancia del cultivo de cacao para los países tropicales, la posibilidad de impactos en los rendimientos de éste ante el cambio climático y la poca inversión en investigación en los países en desarrollo, es de suma importancia encontrar métodos y herramientas para identificar los espacios donde actualmente el potencial climático para producir cacao es alto y estimar los posibles impactos que inducirán el temido cambio climático a lo largo del presente siglo XXI.

1.2. Estado de la cuestión

El uso de las aplicaciones incluidas en la familia de las tecnologías de la información geográfica (TIG), específicamente de las herramientas de modelado de distribución espacial de especies, ha sido comúnmente utilizado en diferentes países para predecir hábitats (Cowley *et al.*, 2000; Gogol-Prokurat, 2011), manejo de ecosistemas (Elith y Leathwick, 2009), desarrollo agropecuario (Rounsevell *et al.*, 2003) e impactos de cambio climático (Brzeziecki *et al.*, 1995).

Existen dos grandes grupos de modelos de distribución de especies: mecanísticos o correlativos (Beerling *et al.*, 1995). Los modelos mecanísticos tienen por objeto incorporar mecanismos limitantes fisiológicamente para la tolerancia de una especie a las condiciones ambientales y, por lo tanto, requieren un conocimiento detallado de la respuesta de las especies a factores ambientales. Entre éstos encontramos a ECOCROP (FAO, 2003) y DSSAT (Jones *et al.*, 2003). Por su parte, los modelos correlativos estiman las condiciones ambientales que son aptas para una especie, asociando los registros de presencia de especies con una serie de variables ambientales que pueden afectar la fisiología y probabilidad de presencia. Como ejemplos de este segundo tipo de modelos cabe citar a BIOCLIM (Nix, 1986; Busby, 1991), DOMAIN (Carpenter *et al.*, 1993) y MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006) como los más extendidos.

Previo al inicio del presente estudio, se reflexionó sobre el hecho de que para el caso de los modelos mecanísticos se requiere un conocimiento especializado sobre la respuesta de la especie a ciertos factores ambientales y, lo que es más importante, que diversos estudios han probado que los modelos correlativos pueden obtener resultados similares o incluso mejores que los modelos mecanísticos (Robertson *et al.*, 2003). Asimismo, se tuvo en cuenta que los modelos mecanísticos son más difíciles de construir y que además requieren una validación de campo y de laboratorio extensiva. Esto está en contraste con los modelos correlativos, que solamente requieren datos de registro de presencias (Kearney y Porter, 2009).

1.3. Objetivos

El presente trabajo tiene como propósito general contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático y a la adaptación de las actividades productivas mediante la generación de información relevante para la planificación y ordenamiento del territorio nicaragüense. En este contexto, el **objeti-**

vo general de esta investigación es *estimar el impacto del cambio climático en distribución actual y futura de las áreas de producción del cultivo del cacao (Theobroma cacao) en Nicaragua, mediante el uso de herramientas de modelos de distribución de especies.*

Este objetivo general se fundamenta en la hipótesis de que los modelos de distribución de especies desarrollados en los últimos años mediante el concurso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son adecuados para obtener una aproximación certera sobre las áreas de presencia actual y futura de diferentes especies animales y vegetales en función de una serie de variables definidores de su espacio ecológico, destacando dentro de éstas las de origen climático.

Para lograr el objetivo general planteado es necesaria la consecución de una serie de objetivos secundarios que se exponen a continuación:

1. Delimitar las áreas de distribución del cultivo de cacao en el presente.
2. Estimar la distribución de las áreas del cultivo de cacao para el año 2050.
3. Identificar que variables ambientales tiene mayor peso en la distribución presente y futura de del cultivo de cacao.
4. Identificar la interrelación espacial de las zonas de distribución para cacao y café.

1.4. Metodología aplicada

1.4.1. Obtención de los datos de clima actual y otras variables derivadas.

1.4.1.1. Variables climáticas básicas

Para obtener los datos climáticos básicos actuales se ha usado la base de datos *Worldclim* (Hijmans *et al.*, 2005, disponible en www.worldclim.org). Esta base de datos recoge datos históricos del clima que representan promedios de largo plazo (1950-2000) de precipitación y temperatura media de las máximas, media de las mínimas y media mensuales. Estas variables se presentan en formato ráster (GRID de ESRI) con una resolución espacial de 30 arco-segundos por píxel (aproximadamente 1km² en el ecuador), habiendo sido generadas a partir de la interpolación de datos provenientes de estaciones meteorológicas con un algoritmo *spline* usando longitud, latitud, y altitud como variables independientes.

Para crear esta base de datos, Hijmans *et al.* (2005) usaron como fuente cinco grandes bases de datos climáticas: GHCN (*Global Historical Climatology Network*), FAO (Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), WMO (Organización Mundial Meteorológica), CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) y R-HYdronet (Red Regional Electrónica de Datos, Hidrometeorológica para América del Sur, América Central y el Caribe); usándose adicionalmente bases de datos específicas de países como Australia, Nueva Zelanda, Ecuador, Perú, Bolivia, Noruega, Suecia, Finlandia y Dinamarca, entre otros. En concreto, la base de datos de Worldclim recoge registros mundiales de precipitación a partir de 47.554 estaciones, la temperatura media de 24.542 y la temperatura mínima y máxima de 14.835. Centrándonos en los datos en que se basa Worldclim para Nicaragua, señalar que esta base de datos utiliza 225 estaciones con datos de precipitación, 220 estaciones con temperatura media, y 2 estaciones con temperaturas mínimas y máximas, todas ellas ubicadas, como es lógico, en territorio nicaragüense.

1.4.1.2. Variables bioclimáticas

Dentro de la base de datos WorldClim se recogen también variables bioclimáticas que se derivan directamente de los valores mensuales de la temperatura y de la precipitación con el fin de generar variables más significativas desde el punto de vista biológico. Estas variables bioclimáticas (ver tabla

1) fueron en origen creadas para representar tendencias, estacionalidad y factores ambientales extremos o limitantes (Busby 1991). Todas las variables de este grupo (las cuales se listan a continuación) fueron consideradas para la realización de este trabajo.

Tabla 1. Variables bioclimáticas.

BIO No.	Descripción.
▪ BIO1	▪ Temperatura promedio anual (°C).
▪ BIO2	▪ Rango promedio diario (promedio mensual (máx.temp – min temp)).
▪ BIO3	▪ Isothermalidad (°C) (BIO2/BIO7) * 100).
▪ BIO4	▪ Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100).
▪ BIO5	▪ Temperatura máxima del mes más cálido (°C).
▪ BIO6	▪ Temperatura mínima del mes más frío (°C).
▪ BIO7	▪ Rango anual de Temperatura (BIO5-BIO6) (°C).
▪ BIO8	▪ Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso (°C).
▪ BIO9	▪ Temperatura promedio del cuatrimestre más seco (°C).
▪ BIO10	▪ Temperatura promedio de cuatrimestre más cálido (°C).
▪ BIO11	▪ Temperatura promedio del cuatrimestre más frío (°C).
▪ BIO12	▪ Precipitación anual (mm).
▪ BIO13	▪ Precipitación del mes más lluvioso (mm).
▪ BIO14	▪ Precipitación del mes seco (mm).
▪ BIO15	▪ Estacionalidad precipitación (Coeficiente de Variación).
▪ BIO16	▪ Precipitación del trimestre más húmedo (mm).
▪ BIO17	▪ Precipitación del trimestre más seco (mm).
▪ BIO18	▪ Precipitación del trimestre más caliente (mm).
▪ BIO19	▪ Precipitación del trimestre más frío (mm).

1.4.1.3. Variables de evapotranspiración potencial

La consideración en el presente trabajo de las nueve variables existentes relacionadas con la evapotranspiración potencial (ETP) es para comparar la contribución de esta variable para identificar las zonas con aptitud climática para el cultivo, dado que este hecho ha sido señalado como muy trascendente en algunos estudios (Anim-Kwapong y Frimpong, 2005). Al incorporar estas variables se espera contar con factores ambientales adicionales para guiar la toma de decisiones.

Estas variables relacionadas con la ETP, son calculadas a partir de estimaciones mensuales obtenidas mediante un método empírico (Hargreaves, 1985). Se decidió usar éste método debido a que requiere menos datos que otro método muy conocido como Penman-Monteith FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) y sus resultados son muy similares (Hargreaves y Allen, 2003). De hecho investigaciones recientes confirman la similitud de los resultados en zonas tropicales para ambos métodos (Asare *et al.*, 2011).

Puesto que el método de Hargreaves para estimar la evapotranspiración únicamente necesita datos de radiación solar y rangos de temperatura (temperatura máxima – temperatura mínima), la generación de las estimaciones mensuales de ETP para el área de estudio resultó sencilla, utilizándose para ello los datos mensuales de temperatura máxima y mínima extraídos de WorldClim. A continuación se relacionan las variables de ETP calculadas en la tabla 2.

Tabla 2. Variables de evapotranspiración (ETP)

ETP No.	Descripción
ETP1	Evapotranspiración total anual
ETP2	Estacionalidad de la ETP (Coeficiente of Variación)
ETP3	ETP máxima del mes más cálido
ETP4	ETP mínima del mes mas frío
ETP5	Rango de PET (ETPmax - ETPmin)
ETP6	ETP del trimestre más lluvioso
ETP7	ETP del trimestre más seco
ETP8	ETP del trimestre más caluroso
ETP9	ETP del trimestre más frío

1.4.2. Obtención de los datos de clima futuro.

Para obtener la información sobre el clima futuro, se usó como base fundamental los datos generados por el CIAT, que es la institución de investigación que coordina a nivel global el Programa sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS por sus siglas en inglés) y cuyos datos se encuentran actualmente disponibles en <http://www.ccafs-climate.org/>.

A su vez, el CIAT ha generado esta información teniendo como base la información del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, siglas en inglés), el cual se basó en los resultados de diecinueve modelos climáticos globales (GCMs) (Tabla 3). Estos datos están disponibles a través de una interfaz del IPCC (<http://www.ipcc-data.org/>), pudiéndose también acudir directamente a las instituciones que desarrollaron cada uno de los modelos, ya que que también están disponibles en sus respectivas páginas web. Dado que la resolución espacial de los resultados de los modelos globales es inapropiada para el análisis de los impactos en la agricultura, debido a que en casi todos los casos la medida de las cuadrículas en más de 100 km², la reducción de escala es, por tanto, necesaria para proporcionar superficies de mayor resolución de los climas futuros esperados, haciendo que, de esta forma, los impactos probables del cambio climático en la agricultura puedan ser modelados con mayor precisión. Para hacerlo, CIAT utilizó un método simple de reducción de escala (llamado método delta), basado en la suma de las anomalías interpoladas a las superficies de alta resolución mensuales para las variables de WorldClim. El método, básicamente, produce una superficie suavizada (interpolación) de los cambios en los climas (deltas o anomalías) para después aplicar esta superficie interpolada al clima de referencia (de WorldClim), teniendo en cuenta el posible sesgo debido a la diferencia en las líneas de base. El método supone que los cambios en los climas sólo son relevantes a escala gruesa, y que las relaciones entre las variables se mantienen hacia el futuro (Ramírez y Jarvis, 2010).

Para aplicar en este trabajo el modelo de distribución de especies en escenarios futuros, se usó como datos climáticos los diecinueve modelos de circulación global del Cuarto Informe de Evaluación (2007) para el escenario de emisiones SRES--A2 (SRES se refiere al Reporte Especial sobre Escenarios de Emisión del IPCC) y para un período de años corriendo promedios (es decir, 2020 – 2049 [que para fines prácticos será llamado “2050” a lo largo del documento]).

Es necesario señalar que solamente se usará el escenario A2 conocido como “Business as usual” ya que la incertidumbre relacionada a los SRES (escenarios de emisión según el cuarto informe del IPCC) es mínima para el promedio de años 2020 - 2049 (IPCC, 2007).

En concreto, las variables bioclimáticas se generaron a partir de las cuatro variables mensuales (temperatura media, máxima, mínima y precipitación total), que al igual que en cada conjunto de datos (escenario SRES -GCM - intervalo de tiempo), compone el escenario elegido. La resolución espacial de estos datos descargados de <http://www.ccafs-climate.org/> es de 30 segundos de arco (Ramírez y Jarvis, 2010), a partir de los cuales se generaron las variables bioclimáticas.

Tabla 3. Modelos climáticos globales (GCMs) usados, en el estudio.

Modelo	País de Origen
BCCR-BCM2.0	Noruega
CCCMA-CGCM3.1 (T47)	Canadá
CNRM-CM3	Francia
CSIRO-Mk3.0	Australia
CSIRO-Mk3.5	Australia
GFDL-CM2.0	EEUU
GFDL-CM2.1	EEUU
GISS-MODEL-ER	EEUU
INGV-ECHAM4	Italia
INM-CM3.0	Rusia
IPSL-CM4	Francia
MIROC3.2-MEDRES	Japón
MIUB-ECHO-G	Alemania / Korea
MPI-ECHAM5	Alemania
MRI-CGCM2.3.2A	Japón
NCAR-CCSM3.0	EEUU
NCAR-PCM1	EEUU
UKMO-HADCM3	Reino Unido
UKMO-HADGEM1	Reino Unido

1.4.3. Registros de presencia del cultivo

El principal requerimiento para utilizar el algoritmo de modelado de distribución de especies MaxEnt (cuyos fundamentos se explican en el apartado siguiente), es poder contar con puntos de evidencia de la especie que se quiere modelar. Así, la obtención de estos puntos resulta fundamental para el objetivo de encontrar las áreas principales o núcleos de concentración de la producción de cacao en Nicaragua. Para la recopilación de estos puntos se contó con el apoyo del comité ejecutivo de la Mesa Nacional de Cacao y la colaboración de varios actores locales y agencias como GIZ y LWR, el laboratorio de Biociencia de la UNAN (Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua) y *TechnoServe*. Además, también se tomaron puntos de evidencia del proyecto CUP (*Coffe Under Pressure*) liderado por CIAT, de fincas donde además de café sus sistemas incluían la producción de cacao (Läderach *et al.*, 2010b).

En general, la información fue obtenida en formatos de .XLS (Excel de Microsoft) por lo que tuvo que realizarse una adaptación de la información para incorporarla a las aplicaciones de SIG. En primera instancia se estandarizó el sistema de referencia espacial, para usar los datos en grados decimales con el datum WGS84. Posteriormente, las tablas fueron importadas en ARCGIS 10 usando la opción de “Add XY data” para convertirlas luego en shapefile. En este formato son revisadas y analizadas con respecto a las capas climáticas y administrativas. Finalmente los puntos que se seleccionaron para usarse fueron guardados en formato abierto .CSV (*comma-separated values*) para usarlos como muestras para ejecutar el modelo MaxEnt.

En total fueron compilados 1708 registros de ubicaciones de fincas de cacao, los cuales fueron sometidos a procesos de revisión sobre sus coordenadas y de proximidad entre estos, considerando que los píxeles de los grids del clima a usar tienen una resolución aproximada de 1 km. Tras esta revisión se utilizaron finalmente 1132 puntos para el análisis.

Después de algunas pruebas y calibraciones iniciales con el modelo y obtener algunas aproximaciones sobre las áreas actuales de producción, el día 30 de marzo de 2012 se procedió a validar éstas en una reunión de trabajo (ver lista de participantes en anexo I) con el ejecutivo de la Mesa Nacional de Cacao y miembros de cooperativas de productores de cacao. En este caso los participantes, valiéndose del conocimiento en campo de las áreas de distribución, han revisado y validado los resultados iniciales para condiciones climáticas actuales. Incluso han recomendado incluir nuevos puntos donde consideraron que el resultado del modelo no representaba áreas que existen en la realidad (puntos amarillos en la figura 1).

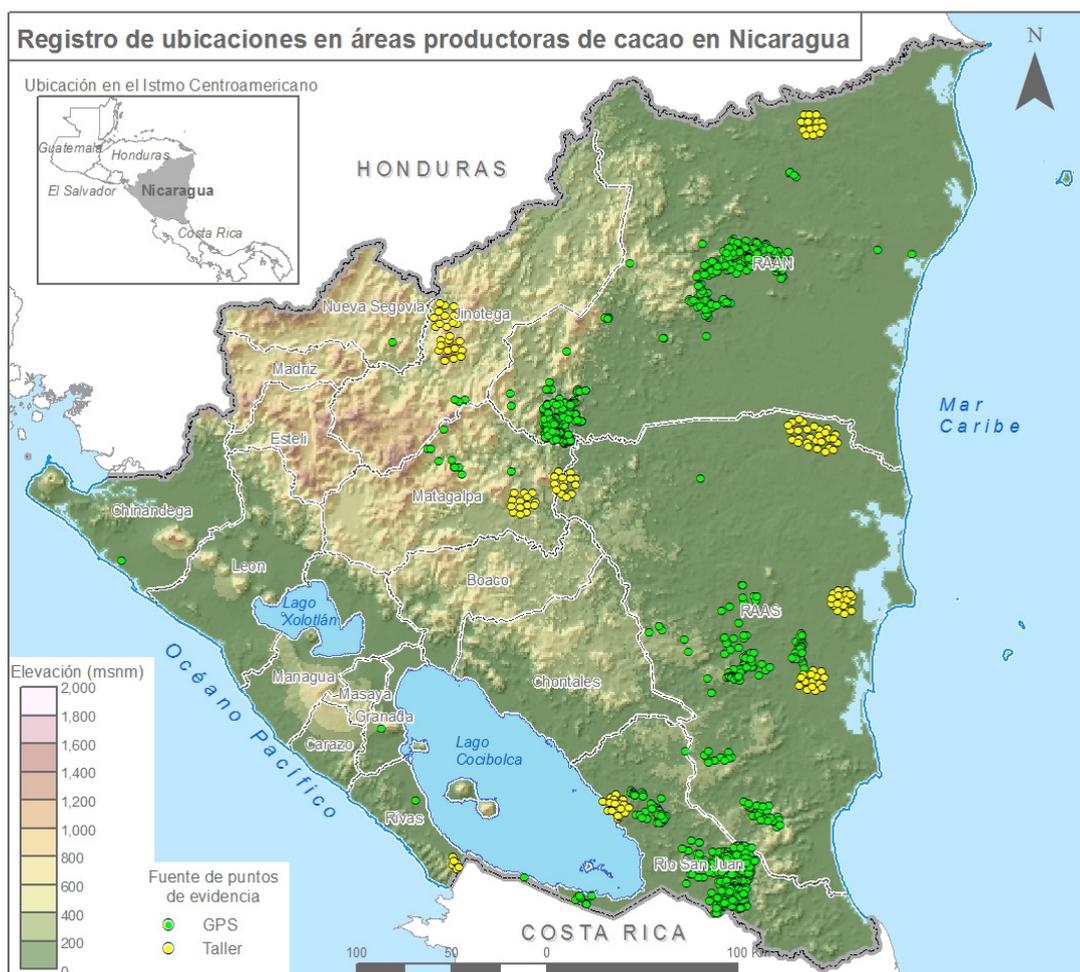


Figura 1. Localización y distribución de los registros utilizados para correr el modelo. Los puntos de color verde se obtuvieron a través de la Mesa Nacional de Cacao, y fueron levantados en campo usando GPS. Los puntos amarillos se obtuvieron por indicaciones en un mapa de trabajo durante un taller con el ejecutivo de la Mesa Nacional de Cacao.

1.4.4. Aplicación del modelo de distribución de especies MaxEnt

1.4.4.1 El modelo de distribución de especies MaxEnt

MaxEnt es generalmente considerado como el método más preciso para obtener modelos de distribución de especies (Elith *et al.*, 2006), por lo que fue el elegido de entre los distintos modelos correlativos que existen. Además, otro factor que motivó su elección es el hecho de que este software es gratuito (se puede obtener directamente en www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt), lo que facilitaría la réplica de el método utilizado en este estudio por parte de otras instituciones o investigadores en Nicaragua.

Éste es un método de inteligencia artificial que aplica el principio de máxima entropía para calcular la distribución geográfica más probable para una especie. Así, MaxEnt estima la probabilidad de

ocurrencia de la especie buscando la distribución de máxima entropía, sujeta a la condición de que el valor esperado de cada variable ambiental, según esta distribución, coincide con su media empírica. El resultado del modelo expresa el valor de idoneidad del hábitat para la especie como una función de las variables ambientales. Un valor alto de la función de distribución en una celda determinada indica que ésta presenta condiciones muy favorables para la presencia de la especie. El programa proporciona las curvas de respuesta de la especie ante las distintas variables ambientales y estima la importancia de cada variable en la distribución de la especie (Phillips *et al.*, 2006). La distribución de probabilidad es la suma de cada variable dividida por una constante ajustada para asegurar que los valores de probabilidad tienen un rango de 0-1. En general, los modelos predictivos de distribución de especies poseen limitaciones de carácter biológico, referidas a que si la distribución actual de una especie estuviera afectada por acontecimientos pasados o cambios en las características que hacen posible su aptitud, es posible que el modelo no los detecte. También pueden presentarse limitaciones de tipo metodológico. Así, para nuestro caso concreto que hemos trabajado con datos de presencia, los posibles errores son de posibles falsos positivos (el modelo predice para una ubicación la presencia de la especie, pero al verificarse mediante la observación in situ no se encuentran tal especie, lo cual incluso está relacionado con que los modelos asumen que los hábitats están saturados) (Seoane y Bustamante, 2001). Otra limitante metodológico relevante consiste en suponer que el modelo usa todas las variables importantes para la distribución de la especie, apareciendo entonces un error por omisión por parte del investigador que no ha tenido en cuenta esas variables (Lennon, 1999).

1.4.4.2. Interpretación de los resultados de MaxEnt: los rangos de aptitud climática

Los resultados de MaxEnt son estimaciones que consideran la aptitud climática. El concepto de aptitud climática se entiende como el nivel de ciertas características climáticas que determinan que áreas tienen potencial para albergar una determinada especie animal o vegetal. Así, en este trabajo indica la posibilidad de cultivar la planta del cacao de forma exitosa.

El algoritmo de MaxEnt genera distribuciones de probabilidad en un rango de 0–1, donde 1 representa una alta probabilidad de condiciones adecuadas para la especie y 0 ninguna probabilidad de presencia (Phillips *et al.*, 2006). Este rango continuo puede ser dividido en intervalos regulares para representar los diferentes niveles de aptitud climática de una especie. En el caso concreto de este trabajo, se elaboraron diferentes mapas cuya leyenda recogía diferentes intervalos, los cuales fueron revisados durante el taller con miembros del ejecutivo de la Mesa Nacional de Cacao. El consenso de los participantes en el taller fue que la mejor representación se obtenía con los rangos de 0.2. Así, la tabla 4 recoge los intervalos usados para el presente estudio.

Tabla 4. Categorías usadas para los mapas de aptitud presente y futura.

Rango MaxEnt	Categoría	Color en mapa
0 – 0.2	Escasa	Sin color
0.21 – 0.4	Bajo	Naranja
0.41 – 0.6	Bueno	Amarillo
0.61 – 0.8	Muy Bueno	Verde claro
0.81 – 1	Excelente	Verde

1.4.4.3. Agrupación de las variables climáticas consideradas

En este trabajo se han utilizado tres conjuntos de variables o modelos. Un primer modelo, “BIO”, utiliza únicamente las 19 variables bioclimáticas de WorldClim anteriormente descritas y comúnmente usadas para modelar la distribución de especies (Evangelista *et al.*, 2011; Soria-Auza *et al.*, 2010). El segundo modelo propuesto, “ETP”, incluye además de estas 19 variables, otras 9 variables referidas a la evapotranspiración potencial. Esta variables adicionales son incluidas ya que como se ha mencionado anteriormente en este documento, algunos estudios han señalado que la evapotranspiración es una

variable de mucha importancia para el cultivo del cacao (Anim-Kwapong y Frimpong, 2005; Läderach *et al.*, 2012). El tercer conjunto de variables, denominado “Bio Prec + ETP”, considera las variables bioclimáticas de precipitación junto con las variables de evapotranspiración. Por tanto, en este último caso se excluyen las variables bioclimáticas relativas a la temperatura, las cuáles han sido generadas a partir de valores mensuales de temperatura (ver apartado 1.4.1.2) al igual que las variables de ETP (ver apartado 1.4.1.3).

1.4.4.4. Validación de los resultados obtenidos con los datos de clima actual y aplicación del modelo para el horizonte 2050

Previo a la aplicación definitiva del modelo, se usaron los 1132 puntos de evidencia para crear dos nuevas capas: una para entrenamiento (training data) con el 80% del total de puntos y otra de evaluación (test data) con el restante 20%. Se usaron los tres sets de variables para las condiciones climáticas actuales (Worldclim) y con estos correr el modelo de MaxEnt. Los resultados de MaxEnt que son en formato ASCII fueron convertidos a formato Grid de ESRI, y luego se extrajeron los valores de los tres resultados a los puntos de evaluación. Con esto se genera una tabla para comparar los valores estimados versus los observados. Para hacerlo se usa la prueba de Chi-cuadrado (χ^2) con un grado de libertad. Dado que los resultados son diferentes a valores binarios, se ha escogido un umbral a partir del cual la estimación de MaxEnt se considera presente, en este caso el umbral usado es 0.2. De esta forma se valida los puntos de evaluación con una medida estadística (Ortega-Huerta y Townsend, 2008). Además, debido a que solamente tenemos datos de presencia, se evalúa la proporción de ocurrencias observadas estimadas correctamente. Esta evaluación es llamada prueba de sensibilidad o “fracción de verdaderos positivos” (Pearson, 2007) y sirve para validar la capacidad de los modelos para determinar las áreas de distribución del cultivo para condiciones actuales.

Para realizar esta evaluación se calcula:

$$a/(a+c)$$

Donde:

a = verdaderos positivos

c = falsos negativos

Una vez estimado el error para cada conjunto de variables usando las variables climáticas representativas del clima actual, se usa el 100% de los puntos para las ejecuciones finales del modelo, con lo que éstas usan la totalidad de los puntos de evidencia.

Una vez obtenidas las variables tanto para el clima actual como para clima futuro (GCMs) se procede a correr MaxEnt para cada conjunto de variables por cada modelo, que como se ha indicado con anterioridad, son 19. Es decir se debe correr el modelo de máxima entropía en 57 ocasiones ($3 \times 19 = 57$). Para facilitar esta tarea se hace uso de la opción de ejecutar el modelo por lotes (*batch running*).

Para tal fin se crea un archivo .bat con una línea para ejecutar cada uno de los modelos de circulación global como capas de proyección, como por ejemplo:

```
java -mx1024m -jar C:\MaxEnt\MaxEnt.jar -s C:\cacao_nic\shapes\puntos_10_5.csv -e  
C:\Datos\presente -j C:\Datos\futuro\2050\bccr_bcm2_0 -o  
C:\cacao_nic\resultados\Bios\2050\bccr_bcm2_0 -J -P -a -r nowarnings
```

En ésta línea se llama al programa que se ejecuta en Java, se le indica en que directorio están las muestras o puntos de evidencia (-s), las variables ambientales actuales (-e), las proyecciones ambientales o condiciones de futuro en nuestro caso (-j) y la carpeta de salida (-o). Así mismo se puede indicar

otros parámetros como: medir la importancia de cada variable (-J), crear curvas de respuesta para mostrar como la probabilidad de ocurrencia depende del valor de cada variable ambiental (Phillips y Durdik, 2008).

1.4.4.5. Medidas de evaluación de la incertidumbre para los modelos de distribución generados para el horizonte 2050.

La aptitud futura del cultivo es estimada usando cada uno de los diecinueve modelos GCM por separado, vía los algoritmos descritos anteriormente, aunque posteriormente de los resultados obtenidos de todos los GCM se genera un promedio para presentarlo como un resultado final. Considerando que la incertidumbre se puede presentar en términos de la dispersión de las predicciones, la comparación entre modelos nos permitirá evaluar ésta (Blenkinsop y Fowler, 2007; Zhang *et al.*, 2011).

Para medir la incertidumbre entre GCM se utilizan dos cálculos:

- El *coeficiente de variación* (C_V) entre los modelos, el cual es una medida normalizada de la dispersión de una distribución de probabilidad.

$$C_V = (STD/Prom)100$$

Donde:

C_V = Coeficiente de variación

STD= Desviación estándar

Prom= Promedio

Esta sencilla ecuación fue aplicada para cada una de las variables utilizadas de cada GCM, para hacerlo se usó el módulo “*Model Builder*” de ArcGIS 10.

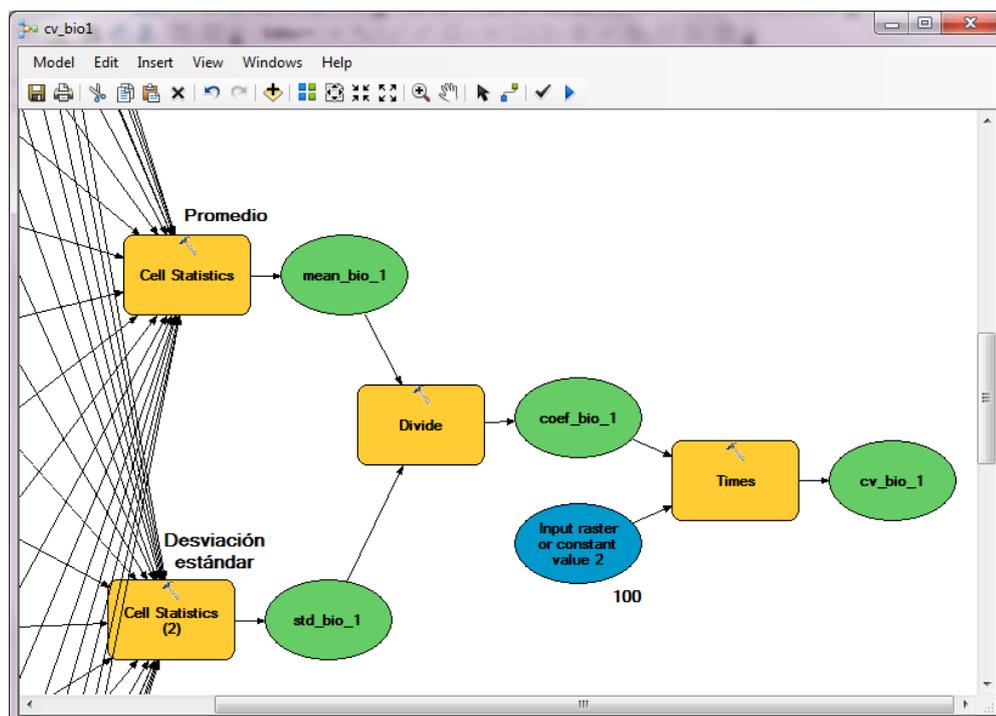


Figura 2. Calculando C_V para la variable Bio1 de todos los GCM.

- La *medida de similitud entre los modelos* (MA por *Measure of Agreement*), es decir, el acuerdo en los modelos calculados como porcentaje de aquellos que predicen cambios en la misma dirección (incrementa, disminuye o permanece igual). Es decir, a partir de los resultados de MaxEnt para cada uno de los 19 GCM, se calcula si los modelos coinciden para estimar ganancias o pérdidas de la aptitud.

Para obtener el cambio de dirección, es necesario primero obtener el cambio de aptitud (chg).

$$\text{chg} = (\text{aptitud futura} - \text{aptitud presente})$$

Este cambio de aptitud se calcula para los resultados de cada modelo por separado, y para el promedio de todos para, finalmente usar una ecuación de condicional y obtener el cambio de dirección.

$$\text{Incrementa} = \text{con}(\text{suit_chg} < 0, \text{con}(\% \text{chg_m\%} < 0, 1, 0), 0)$$

$$\text{Disminuye} = \text{con}(\text{suit_chg} > 0, \text{con}(\% \text{change_m\%} > 0, 1, 0), 0)$$

$$\text{Permanece} = \text{con}(\text{suit_chg} == 0, \text{con}(\% \text{change_m\%} == 0, 1, 0), 0)$$

Donde:

suit_chg = cambio de aptitud, según los resultados de MaxEnt para un GCM

change_m = cambio de aptitud, según el promedio de todos los resultados de MaxEnt para los 19 GCM.

Entonces se obtienen tres capas grids para cada GCM, uno para cada dirección posible. El valor de píxel de estas capas es asignado en virtud de que si coincide con la dirección: 0 para expresar la no coincidencia y 1 para indicar la coincidencia.

Finalmente, se suman los resultados que van en una misma dirección, lo que nos deja tres capas ráster con las tres direcciones posibles. Después, para obtener una sola capa, se usó la opción *Maximum* de *Cell Statistics*, para que a cada píxel se le asigne el valor de la capa de dirección que haya sumado más modelos (ver figura 3).

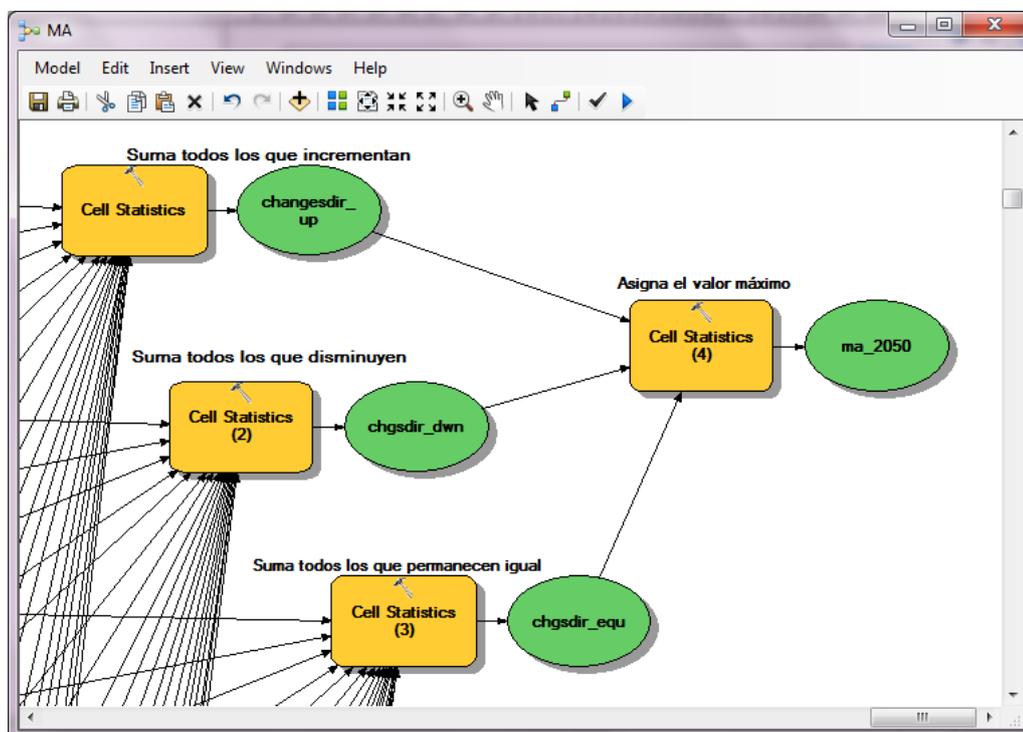


Figura 3. Model Builder con los últimos pasos para estimar MA.

1.4.4.6. Factores ambientales que determinan el cambio de aptitud

Para entender la importancia relativa de las diferentes variables climáticas, se llevó a cabo un análisis de regresión por pasos sucesivos (*stepwise regression*) con el cambio de aptitud (estimado futuro – estimado presente) de cada de punto como variable dependiente y los cambios del modelo promedio en las variables bioclimáticas entre el presente y el futuro como variables independientes. Luego, a partir de los coeficientes estandarizados (β) basados en la desviación estándar (σ) se calcula la contribución relativa de cada variable para el cambio de aptitud.

1.4.5. Análisis de los resultados en el horizonte 2050 para determinar la interrelación espacial de las zonas de distribución para cacao y café.

Para realizar una comparación entre los resultados de distribución de cacao y café en el año 2050, se usaron para el cultivo para cacao los resultados de este estudio y, para identificar las áreas del café los resultados del proyecto CUP, cuya metodología para determinar las áreas distribución es bastante similar al usado en la presente investigación. En concreto, en el caso del café se utilizaron las 19 variables bioclimáticas, resultando las variables de temperatura las más determinantes al momento de estimar el cambio de aptitud para el año 2050 (Läderach *et al.*, 2010). Con este análisis se pretende comparar las áreas consideradas como aptas para ambos cultivos y poder identificar relaciones que podrían existir.

Una vez obtenida las capas en formato ráster para la distribución actual estimada para ambos cultivos, se seleccionaron las áreas con una aptitud mayor al 20 % haciendo una reclasificación, y luego mediante una simple operación aritmética con la calculadora de mapas se suman las capas para identificar un área en común.

$$\text{Cacao} = \text{cacao} > 20\% = 1$$

$$\text{Café} = \text{café} > 20\% = 10$$

Posteriormente, sumando los rústers, la zona común para ambos cultivos y con una aptitud mayor al 20% será igual a “11”.

Con la zona común definida, para cada celda de la capa ráster se creó un punto, con lo cual se obtuvo una nueva capa de puntos que se usó para extraer los valores de diferentes ráster que interesaba comparar. Este último paso se hizo utilizando la herramienta “*Extract Multi Values to Point*” del software ArcGIS 10 de ESRI®. De todo este proceso lo que obtuvimos fue una tabla con los valores de las capas a comparar para cada punto en la zona apta para ambos cultivos (ver figura 4).

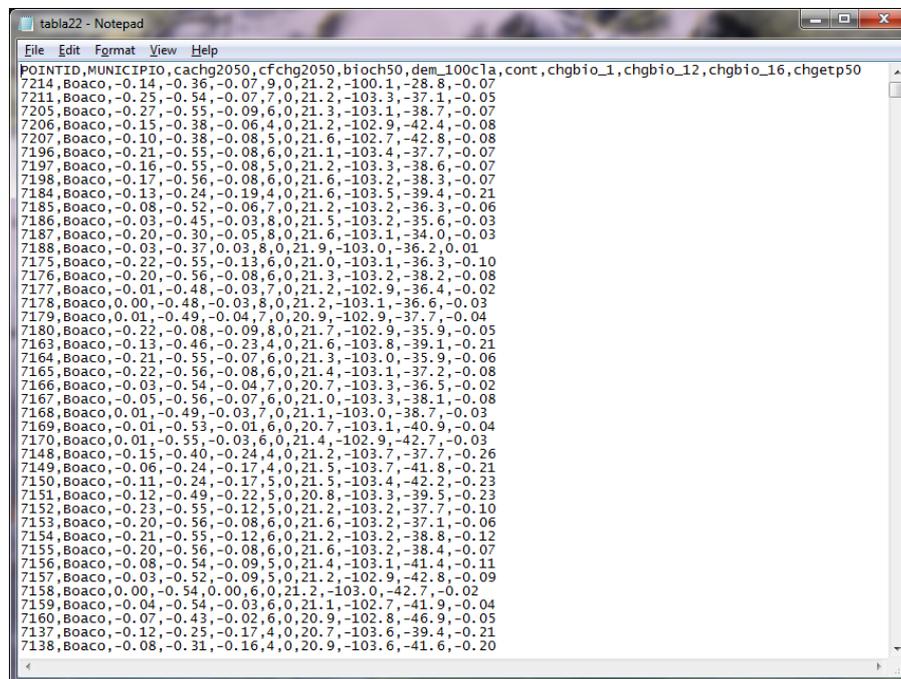


Figura 4. Una vista de la tabla con los valores de los rásters a comparar para cada punto, en formato .CSV

En total se obtuvieron 7214 puntos, siendo éstos los que se utilizaron para comparar los cambios de aptitud estimados para el año 2050 por cada municipio de la zona común. Asimismo, se compara el cambio de aptitud con respecto a la elevación (m.s.n.m.). Para hacerlo se grafican los resultados usando “boxplot” del software R, ya que con éste gráfico se permite graficar la distribución de los datos: mínimo, máximo, mediana, primer cuartil (25%), tercer cuartil (75%) e incluso los valores “outliers”.

Ejemplo del código usado para generar un gráfico con “boxplot”:

```
setwd("C:\\cacao_nic\\master_analysis")
require(gplots)
tabla <- read.csv(file='tabla22.csv', sep=',', header=T)
summary(tabla)
boxplot(tabla$cachg2050 ~ tabla$dem_100cla, col='orange')
```

DESARROLLO ANALÍTICO

2.1 Condiciones climáticas actuales y futuras

El climograma presentado en la figura 5, creado a partir de 1132 puntos, sintetiza las tendencias del clima para 2030 y 2050 para los sitios de muestreo de plantaciones de cacao en el territorio nicaragüense. Así, como en él se observa, en las zonas donde se concentra actualmente la producción de cacao se estima que para el 2050 la precipitación disminuirá de 2887 milímetros a 2779 milímetros. Por otro lado la temperatura aumentará 2.1 °C en promedio con respecto a la actual pasando por un aumento de 1.2 °C en 2030. Para el 2050 el rango de la temperatura promedio del día aumentará de 8.6 °C a 8.9 °C. El número máximo de meses de sequía se mantiene constante en 3 meses.

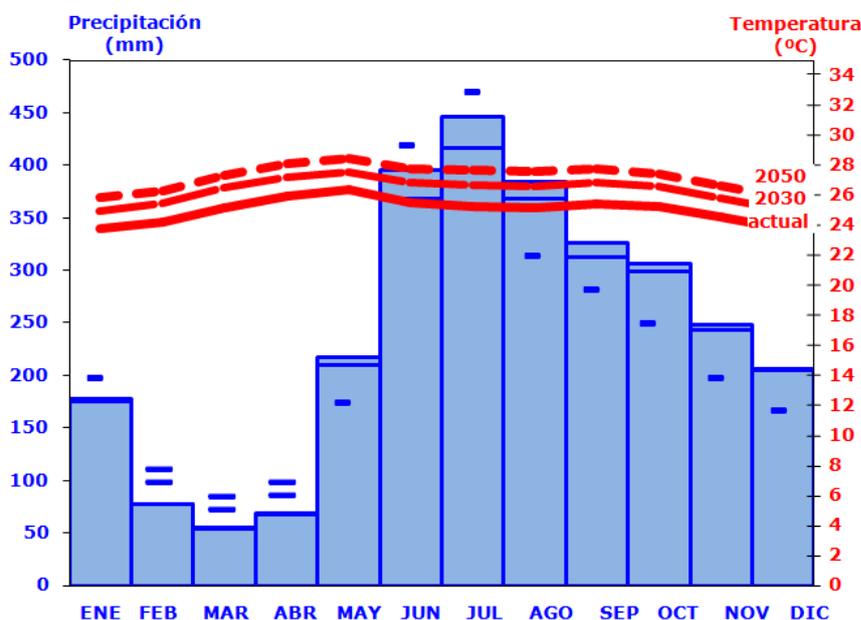


Figura 5. Climograma de síntesis de las tendencias del clima para 2030 y 2050 en territorio adecuado para el cultivo del cacao. Las barras azules muestran la precipitación mensual actual y la proyección para 2050, y las líneas rojas muestran la temperatura media mensual actual, 2030 y 2050. Los signos de igual (=) y negativo (-) sobre las barras simbolizan el no cambio y descenso de las precipitaciones para el año 2050 en cada mes respectivo.

Los cambios en la precipitación fueron determinados por la diferencia entre la precipitación total anual para condiciones actuales (worldclim) y el promedio de la precipitación total anual predicha por los 19 GCM.

De acuerdo a los modelos de predicción, la precipitación en general disminuye en todas las zonas productoras de cacao en Nicaragua para el año 2050, los departamentos que tienen mayor descenso son Rivas, La Región Autónoma del Atlántico SUR (RAAS) y Río San Juan, que pierden hasta 120mm. Los departamentos que menos pierden son Chinandega, Managua, Jinotega y Matagalpa (Figura 6).

Sin embargo, es conveniente señalar que en el caso de la RAAS y Río San Juan la cantidad que disminuiría no es preocupante, dadas las altas precipitaciones de las zonas. De hecho es la zona de mayor precipitación en Nicaragua, con precipitaciones medias anuales por encima de los 2500 mm.

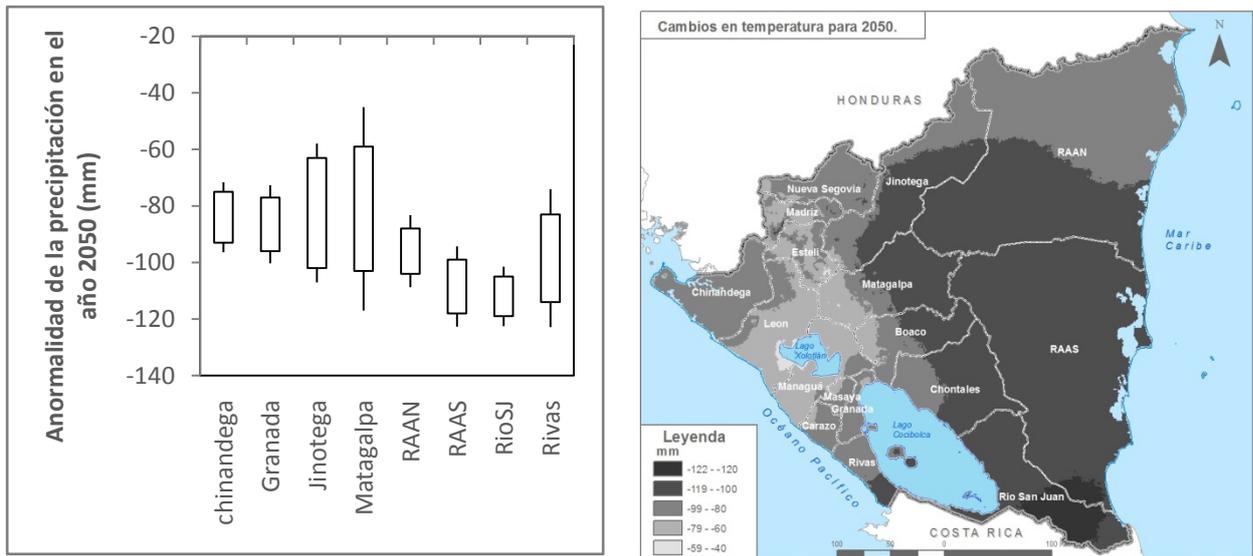


Figura 6. Cambio en la precipitación anual para 2050 en las zonas productoras de cacao en Nicaragua. Los límites de las caja indican los valores máximos promedio y mínimos promedio y los extremos de las líneas representan los valores máximos y mínimos. Los valores máximos promedio y mínimo promedio son definidos por \pm la desviación estándar.

La temperatura media anual aumentará de manera progresiva. En general, este incremento para el año 2050 es de 1.9°C. a 2.3 °C. Según la proyección de los modelos, las zonas cacaoteras de la RA-AN son las que podrían verse afectadas por un incremento un tanto superior a los 2.3 °C, aunque los mayores incrementos de temperatura se estiman para la zona noroccidental del país, coincidiendo con un área conocida en la actualidad como la zona seca. Los departamentos de Jinotega y Matagalpa serían afectados por incrementos entre 2.1 – 2.3 °C aproximadamente, lo que afectaría áreas donde actualmente se desarrollan dos cultivos de importancia económica para los productores de la zona: cacao y café.

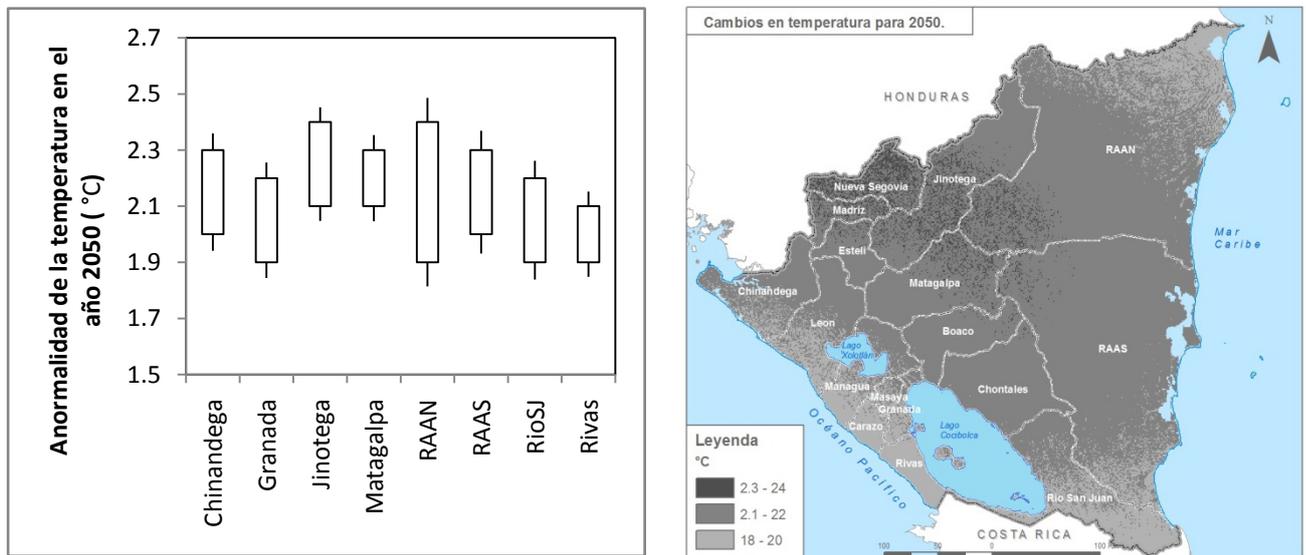


Figura 7. Cambio en la temperatura media anual para 2050 en las zonas productoras de cacao en Nicaragua. Los límites de las cajas indican los valores máximos y mínimos promedio y los extremos de las líneas representan los valores máximos y mínimos. Los valores máximos y mínimos promedio son definidos por \pm la desviación estándar.

2.2 Áreas de distribución del cultivo del cacao. Estimaciones para condiciones actuales.

Los resultados para la evaluación de los tres sets de variables usando Chi-cuadrado (χ^2) para determinar la significación estadística, arrojan que el nivel de significación es $p < 0.001$ para los tres resultados, lo que significa que los modelos son estadísticamente válidos. En cuanto a la valoración de la sensibilidad o “fracción de verdaderos positivos” para determinar la presencia del cultivo de cacao, el conjunto de variables Bio Prec + ETP presenta los mejores resultados, de acuerdo a las estimaciones de MaxEnt para condiciones climáticas actuales. Se ha usado como umbral para considerar la especie como presente el mismo umbral que se usa para determinar la primera categoría en los mapas, es decir 0.21..

Tabla 5. Pruebas de evaluación a los resultados de MaxEnt para condiciones actuales.

	Sensibilidad	p (Chi-cuadrado)
BIO	0.95575	0.000463
BIO ETP	0.95133	0.000519
Bio Prec + ETP	0.96460	0.000231

Una vez obtenida los resultados de MaxEnt para los tres conjuntos de variables se extrajeron los valores de los Grids con la distribución actual, para los 1132 puntos usados como sitios de evidencia en el análisis (ver figura 5).

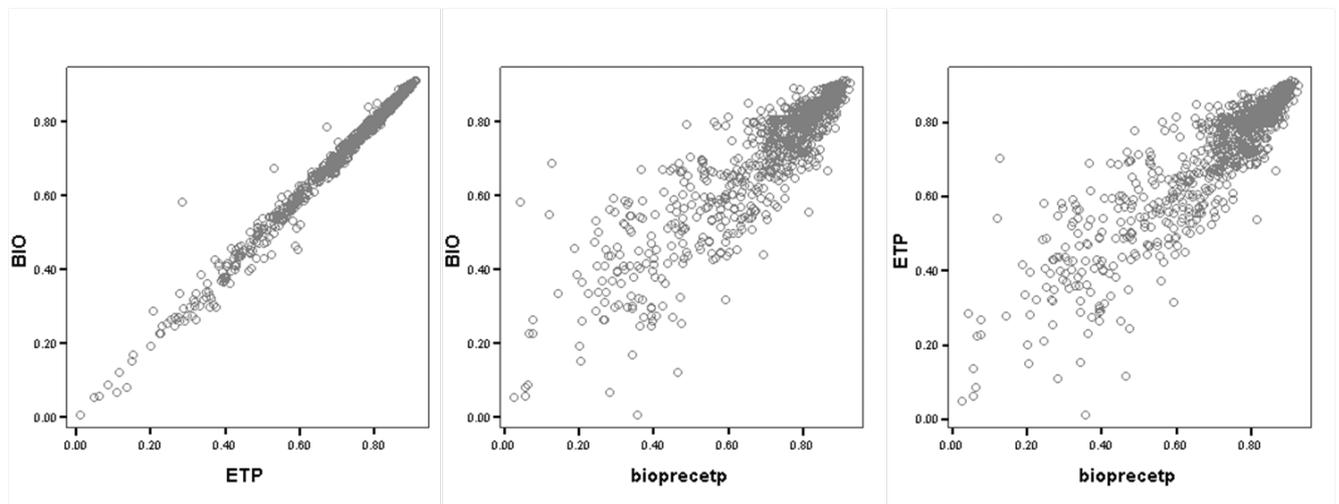


Figura 8. Comparación de los resultados de MaxEnt usando los tres conjuntos de variables para condiciones actuales.

La comparación de los resultados para los tres conjuntos de variables nos permite identificar que para entre BIO y ETP existe una correlación lineal, lo que nos indica que los resultados son muy similares. Esta situación no se da entre los resultados de cada uno de estos dos modelos con los obtenidos con BIO Prec-ETP. Esto es debido a que MAXENT considera las variables de temperatura (contenidas en los dos primeros modelos) como las de mayor contribución a la distribución y cambio en las áreas de producción de cacao. Pero en el mundo actualmente existen zonas de producción de cacao con temperaturas mayores a las que se presentan (actualmente, incluso a las estimadas para el futuro) en las

áreas de producción de Nicaragua, tal es el caso de las zonas en Chiapas, México (Roa-Romero *et al.*, 2009) o Malasia (Wood y Lass, 2001). Recordemos que esta circunstancia es lo que dirigió que en el modelo “Bio Prec + ETP” se excluyeran las variables de temperatura.

A la luz de las comparaciones de los resultados de los tres conjuntos de variables o modelos usados, presentamos a continuación solamente los dos últimos: ETP y Bio Prec+ETP (figura 9)

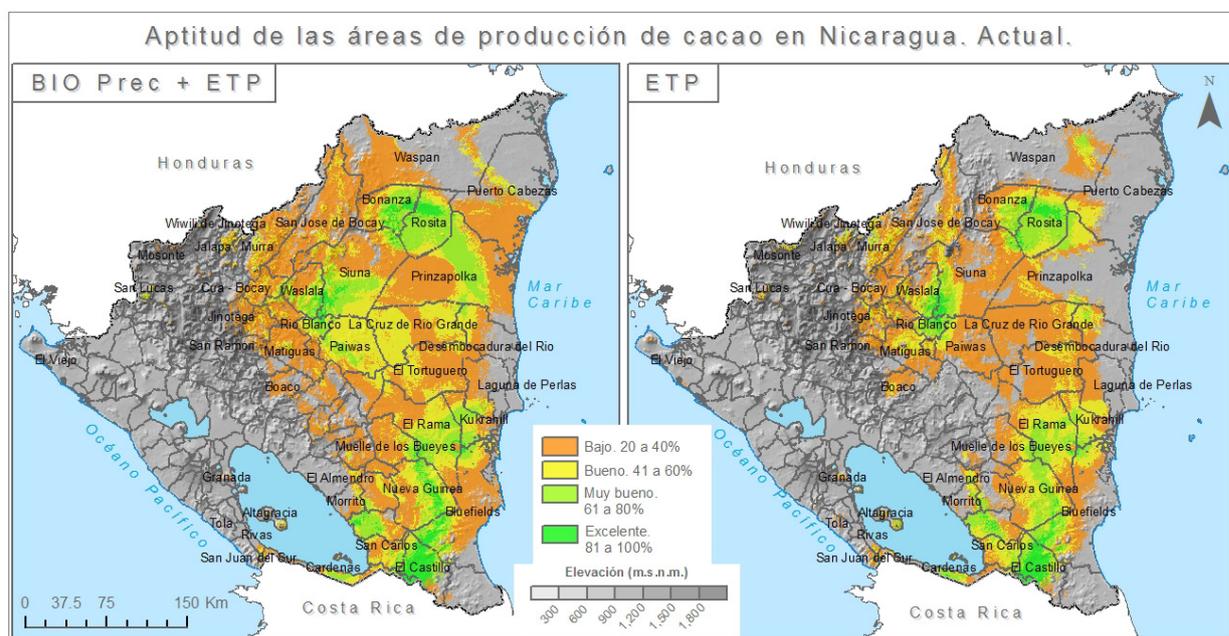


Figura 9. Aptitud actual en las zonas productoras de cacao en Nicaragua. A la izquierda se presenta el resultado del modelo con las variables Bioclimáticas de precipitación mas las variables de evapotranspiración (BIO Prec + ETP), y a la derecha el resultado del modelo de las todas las variables Bioclimáticas mas las variables de evapotranspiración potencial (ETP).

Para la situación actual los resultados en ambos modelos son muy similares para los municipios de El Rama, Nueva Guinea, Bluefields y El Castillo; en cambio para los municipios de Siuna, Prinzapolka, La Cruz de Río Grande y Paiwas el modelo de “Bio Prec + ETP” incluye mas áreas consideradas como excelentes.

De acuerdo a los resultados de MaxEnt, y para ambos modelos, se pueden identificar tres zonas principales donde se concentran las áreas aptas para la producción de cacao. La primera en la zona norte entre los municipios de Waslala, Río Blanco y Siuna. Una segunda zona en la RAAN, entre los municipios de Rosita y Bonanza (el resultado del modelo de “Bio Prec + ETP” incluye además algunas áreas del municipio de Prinzapolka). Y la tercera y mas amplia ubicada en el sureste del país, entre los municipios de San Miguelito, San Carlos, El Castillo, Bluefields, Nueva Guinea y el Rama. En total las áreas consideradas por MaxEnt como climáticamente excelentes en la actualidad (81 a 100%), son aproximadamente unas 215,000 Ha. Para las otras categorías de aptitud las áreas consideradas son incluso mayores: bajo (20 a 40%) con mas de 3 millones de ha, bueno (41 a 60) con cerca de 1.5 millones de ha, y muy bueno (61 a 80% con casi un millón de ha). Se debe considerar que estas áreas estimadas, corresponden a zonas climáticamente aptas para el cultivo, pero no consideran algunos elementos como textura de suelo, pendiente y/o uso actual (áreas urbanizadas y áreas protegidas).

2.3 Áreas de distribución del cultivo del cacao para condiciones en el año 2050.

En las zonas donde se concentran las áreas de producción de cacao en Nicaragua, la precipitación decrecerá para el año 2050. En cambio las temperaturas mínimas y máximas se incrementarán. Las implicaciones de estos cambios son que la distribución de la aptitud de las actuales áreas de produc-

ción de cacao en Nicaragua se verá afectada de forma positiva. Estas áreas en la actualidad son zonas húmedas e hiper-húmedas, por lo que los cambios proyectados a futuro solamente las harán un poco más secas.

En cuanto a los resultados de MaxEnt para las condiciones climáticas del año 2050, el modelo de ETP es pesimista, excepto para una zona concentrada en el municipio de Waspan. Por el contrario el modelo “Bio Prec + ETP” es optimista, prediciendo incluso ganancia de aptitud para algunas zonas. En este punto hay que advertir que las dos cartografías de aptitud climática estimada para el año 2050 (ver figura 10) es en realidad el promedio de los resultados individuales para cada uno de los 19 GCM utilizados.

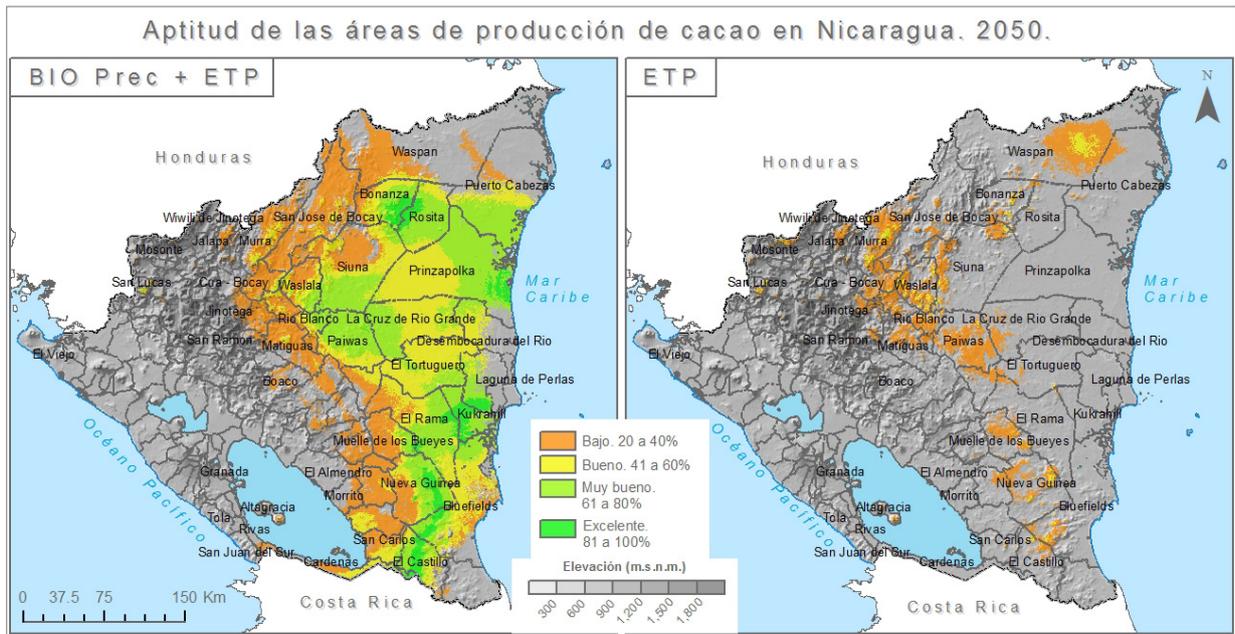


Figura 10. Aptitud climática de las zonas de producción de cacao para 2050.

Así, para 2050, los resultados del modelo “Bio Prec + ETP” que, recordamos, no incluye las variables de temperatura, no predice cambios drásticos en la distribución de las tres principales zonas de producción de cacao. Esto concuerda con que las variaciones de precipitación predichas no son tan altas, ni los incrementos de la evapotranspiración superan la precipitación. Con esto, los resultados del modelo “Bio Prec + ETP” señalan que en comparación con las condiciones actuales podría haber una ganancia de aptitud en las tres principales zonas productoras, principalmente en los municipios de la RAAS: Paiwas, Prinzapolka y Puerto Cabezas. La disminución de precipitación por alrededor de 100 mm, sumado a un ligero incremento de la evapotranspiración (30 mm) hacen que algunas zonas se vuelvan más aptas, desde el punto de vista climático. Es preciso mencionar que las zonas en las que se ubican actualmente la producción de cacao son de altas precipitaciones y humedad relativa, y por ende hacen al cultivo susceptible de enfermedades como la mazorca negra y moniliasis. Al respecto, algunas investigaciones no recomiendan el establecimiento de la producción de cacao en zonas con precipitaciones mayores a 2500 mm para reducir el riesgo de enfermedades criptogámicas (Alvim y Alvim, 1980; Jaimes y Aranzazu, 2010).

Por otro lado, según se observa en los resultados del modelo ETP, los incrementos de temperatura se revelan como factores determinantes para la pérdida relativa de la aptitud de las zonas productoras de cacao, principalmente en la RAAN y RAAS. Esto es así porque el modelo estima como óptimas las condiciones de temperatura con el rango actual 18–28°C, pero como se menciona anteriormente en este documento, actualmente existen plantaciones de cacao que se desarrollan en condiciones de mayor temperatura. De esta manera, lo que sucede en este modelo es que se sobreestima el impacto del cambio de temperatura para el caso específico de cacao en esta zona y, a su vez, esto se debe a que el

modelo estadístico MaxEnt no incluye información fisiológica del cultivo, sino que busca en el clima futuro áreas similares al clima presente (Läderach *et al.*, 2012). Para el caso de las zonas del norte del país (Matagalpa y Jinotega) se espera que el incremento de las temperaturas mínimas si favorezca el desarrollo del cultivo.

2.4 Variables que determinan el cambio de aptitud del cultivo del cacao para 2050.

Para determinar que variables son las más importantes al momento de dirigir el cambio de aptitud, primero se hace necesario determinar el cambio de aptitud para 2050. Esto lo obtenemos gracias a un cálculo de mapas con las capas ráster que resultan de las estimaciones de MaxEnt, al sustraer los resultados de las condiciones para el clima actual de las condiciones para clima futuro (promedio de los 19 GCM).

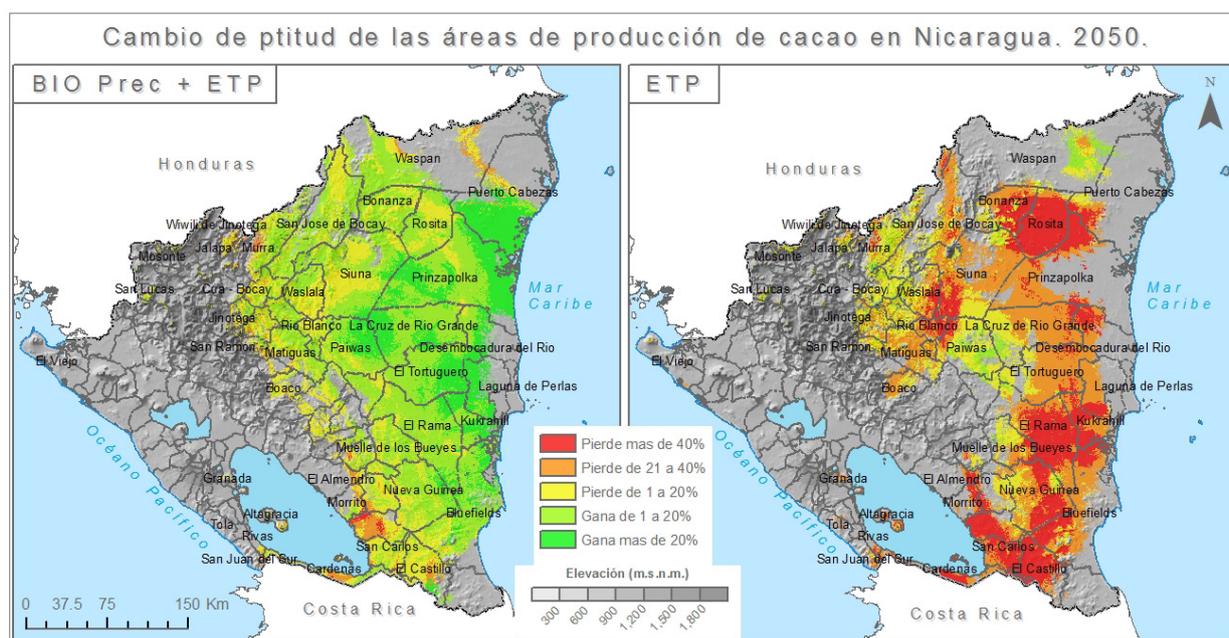


Figura 11. Cambio de aptitud de las áreas de producción de cacao en Nicaragua para 2050.

Las proyecciones para 2050, según el modelo ETP son pesimistas. Pero al retirar las variables de temperatura en el modelo “Bio Prec + ETP”, los resultados predicen cambios bastante positivos principalmente en la RAAN, en los municipios de Puerto Cabezas (Bilwi), Prinzapolka, y en algunos de los municipios de la RAAS como Paiwas, La Cruz de Río Grande y El Tortuguero (Figura 11). En cambio, para el municipio de San Miguelito se predice una pérdida de aptitud promedio de 30% en comparación con las condiciones actuales.

A pesar de que el modelo ETP incluye nueve variables de evapotranspiración potencial, ninguna de éstas es reconocida en el análisis de regresión de pasos sucesivos (stepwise regression) como factor determinante. El análisis de regresión empleado (Tabla 7) explica cerca del 43 % de los cambios de aptitud. Para el modelo ETP, los cambios en las variables de temperatura tienen una influencia generalmente negativa, principalmente para el caso de la temperatura media anual (Bio 1). Según los resultados del modelo un incremento de 0.08 °C (σ del cambio estimado) en esta variable implicaría una disminución de 3.7% (β Bio1 * σ del cambio de aptitud según ETP, es decir $-0,181 * 0,2069885 = -0.03746492$) de aptitud climática en comparación con las condiciones actuales. Por otro lado, para los valores de los coeficientes estandarizados basados en la desviación estándar, los resultados arrojan resultados contradictorios, aun habiendo eliminado aquellas variables con alta correlación.

Ahora se debe considerar que MAXENT estima como rango óptimo las condiciones actuales de los sitios usados como muestra para correr el modelo, pero hay evidencia de sitios en donde el cacao se desempeña muy bien en temperaturas altas, como el caso mexicano (Roa-Romero *et al.*, 2009) con temperaturas máximas de hasta 36 °C, cuando en las zonas cacaoteras de Nicaragua se espera que en 2050 la temperatura máxima aumente de de 31.2 °C a 33.5 °C.

Teniendo en mente que la magnitud de los incrementos de temperatura proyectados por los GCMs no deben ser considerados como un riesgo para los requerimientos climáticos del cacao, se ha corrido el modelo usando únicamente las variables de precipitación mas las variables de evapotranspiración (Bio Prec + ETP). Para los resultados de este nuevo modelo, también se ha elaborado una regresión (Tabla 8) explicando éste modelo un 47% de la varianza total (R^2) de los cambios de aptitud. Según los resultados, la precipitación del trimestre más húmedo (Bio 16) juega un papel principal, ya que si la precipitación aumentara en 11 mm (σ del cambio estimado), la aptitud climática disminuiría en 6% (β Bio1 * σ del cambio de aptitud según ETP, es decir, $-0.48 * 0.12840902 = -0.06163633$); caso contrario, si la precipitación disminuye entonces la aptitud incrementaría. Pero en el caso de la precipitación del mes más seco (Bio 14), por cada 1 mm que incrementa la aptitud se ve afectada de forma positiva incrementando en poco más de 6%.

Dado que en las áreas productoras de cacao, la precipitación es bastante mayor que la evapotranspiración, los cambios que se predicen en la ETP no son significativos para el cambio de aptitud.

Tabla 6. Estadísticas descriptivas de cambio de aptitud para el año 2050 según los modelos usados.

Modelo	Media	Desv. Est.
bioetp 2050	-0,6356195	0,2069885
prec_etp 2050	-0,04836857	0,12840902

Tabla 7: Contribución de las diferentes variables al cambio de aptitud predicho para cacao en el modelo ETP, entre las condiciones actuales y 2050, en las ubicaciones de muestreo utilizadas en el análisis. Los valores representa los coeficientes estandarizados (β) basados en la desviación estándar, también se presenta los valores de B que son estimadores de la relación (positiva o negativa) y Sig. es la significancia estadística.

Variable	B	Intervalo de confianza para B al 95%		β	Sig.
		Límite inferior	Límite superior		
(Constante)	-1,102	-1,608	-0,595		0,00
BIO1 = Temperatura promedio anual (°C)	-0,045	-0,070	-0,021	-0,181	0,00
BIO10 = Temperatura promedio de cuatrimestre más cálido (°C)	0,080	0,063	0,097	0,432	0,00
BIO13 = Precipitación del mes más lluvioso (mm)	-0,012	-0,015	-0,008	-0,463	0,00
BIO16 = Precipitación del trimestre más húmedo	0,012	0,010	0,015	0,664	0,00

BIO18 = Precipitación del trimestre más caliente	0,000	-0,001	0,000	-0,157	0,00
BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	0,117	0,102	0,132	0,669	0,00
BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío (°C)	-0,096	-0,128	-0,064	-0,192	0,00
R ² = 0,431, n=1132, Variable dependiente = Cambio 2050 según modelo ETP					

Tabla 8: Contribución de las diferentes variables al cambio de aptitud predicho para cacao en el modelo “Bio Prec + ETP”, entre las condiciones actuales y 2050, en las ubicaciones de muestreo utilizadas en el análisis. Los valores están ordenados por β que representa los coeficientes estandarizados basados en la desviación estándar, también se presenta los valores de B que son estimadores de la relación (positiva o negativa) y Sig. es la significancia estadística.

Variable	B	Intervalo de confianza para B al 95%		β	Sig.
		Límite inferior	Límite superior		
(Constante)	-0,44	-0,52	-0,37		0,00
BIO16 = Precipitación del trimestre más húmedo	-0,01	-0,01	0,00	-0,48	0,00
BIO17 = Precipitación del trimestre más seco	-0,04	-0,04	-0,03	-0,31	0,00
BIO14 = Precipitación del mes seco	0,06	0,05	0,08	0,24	0,00
ETP9= ETP del trimestre más frío	0,01	0,00	0,01	0,11	0,00
R ² = 0,474, n=1132, Variable dependiente = Cambio 2050 según modelo Bio Prec + ETP					

2.5 Resultados de las medidas de incertidumbre.

2.5.1 Coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) entre los GCMs para las variables usadas tanto en el modelo BIO Prec+ETP y ETP para los años 2030 y 2050 está en un rango de hasta 20%. Incluso se encuentran valores menores a 10% para BIO y menores a 20 % para ETP dentro de las áreas identificadas para la producción de cacao, y por lo tanto puede aceptarse como consistente (Figura 12).

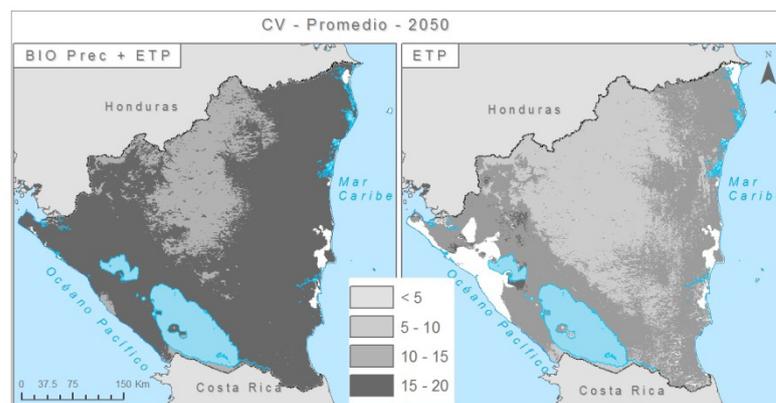


Figura 12. Coeficiente de variación promedio de las variables usadas en los modelos para 2050.

2.5.2 Medida de similitud entre los modelos

Para las ubicaciones en las zonas productoras de cacao, el grado de similitud entre todos los GCMs al predecir cambios en la misma dirección como un promedio de todos los modelos es entre el 80 y 100% (Figura 13) para los resultados en los dos conjuntos de variables presentados. Lo que implica que la incertidumbre relacionada a los resultados de MaxEnt para 19 GCM no es tan grande al momento de estimar el cambio en una dirección. Cabe mencionar que con este resultado se valora solamente la incertidumbre relacionada con los resultados asociados a los GCM, en cambio, dado que solamente se ha trabajado con el SRES A2, en estas estimaciones no se considera la incertidumbre asociada a los SRES.

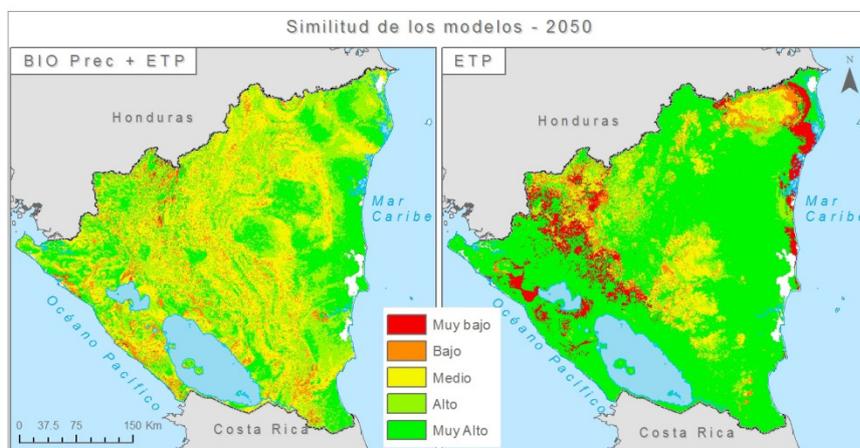


Figura 13. Medida de similitud entre los modelos al estimar cambios en la misma dirección como un promedio de todos los modelos en una ubicación dada para 2050.

2.6 Análisis de la interrelación espacial entre las zonas de distribución para cacao y café en el año 2050.

Con los resultados de los modelos para ambos cultivos (el desarrollado en este trabajo para el cacao con el conjunto de variables “Bio Prec + ETP” y el creado por para el café en el proyecto CUP), se selecciona la zona común, es decir, aquella zona donde ambos cultivos tienen una aptitud climática mayor a un veinte por ciento. De acuerdo a los resultados esta zona se concentra principalmente en la parte centro norte del país, entre los departamentos de Matagalpa y Jinotega (ver figura 14).

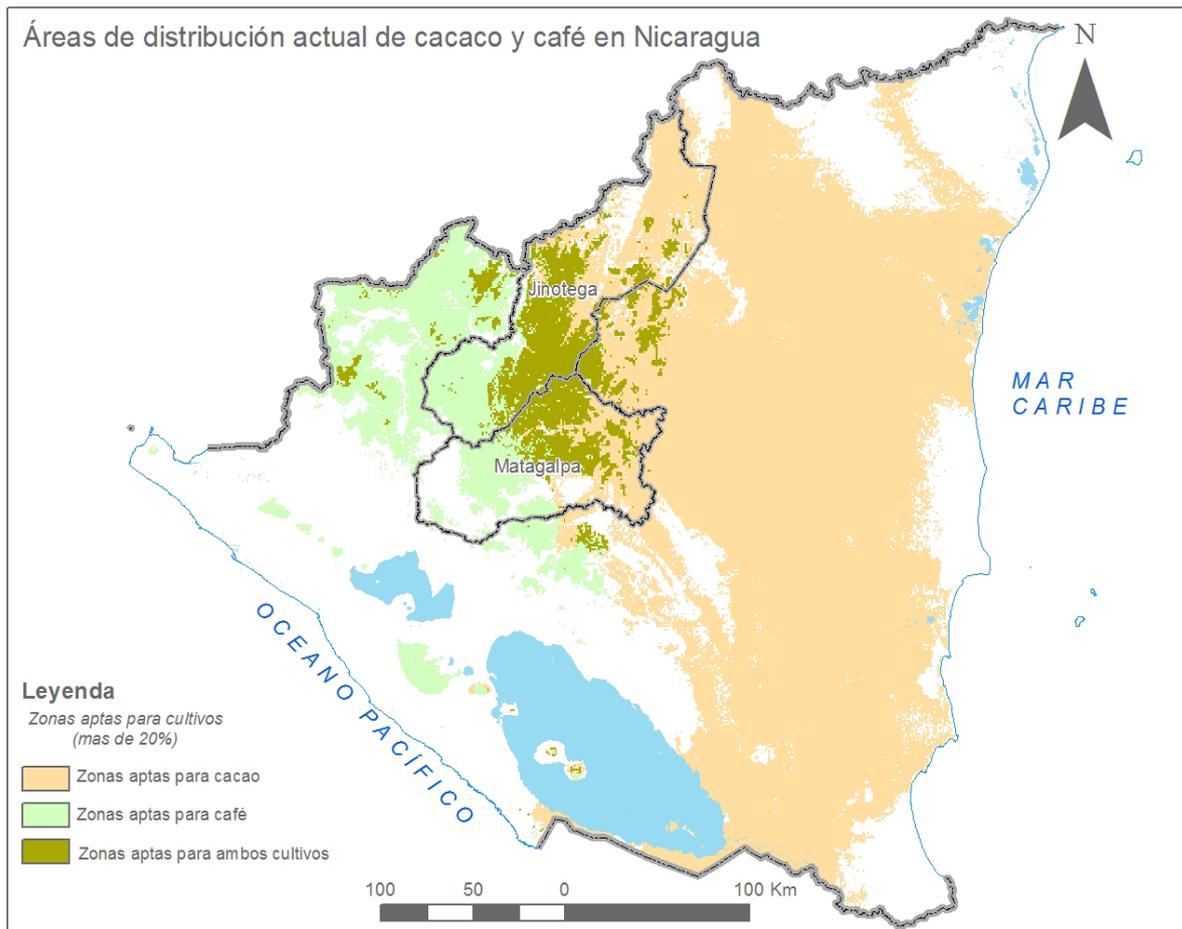


Figura 14. Zonas de Nicaragua donde la aptitud climática actual es mayor a 20% para los cultivos de cacao y café.

Una vez definida la zona común, se compara el cambio de aptitud estimado para el año 2050 por cada cultivo por municipio (figura 15). El promedio de cambio en el cultivo del cacao para todas las zonas es -0.02 que equivale a una disminución de 2%. El municipio con el mayor incremento es San José de Bocay con un incremento promedio de 2%. En general, de acuerdo con los resultados del modelo Bio Prec + ETP, para la zona centro norte no se esperarían cambios sustanciales en la aptitud climática para el cultivo del cacao. Incluso la distribución de las estimaciones por municipio son bastante congruentes.

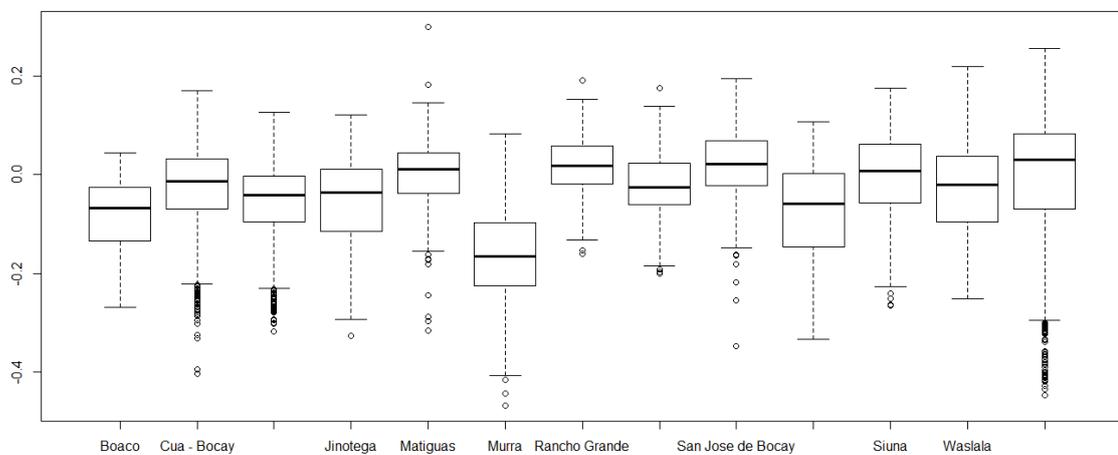


Figura 15. Cambio de aptitud de cacao para las zonas en común agrupada por municipios. La línea negra del medio en la caja representa la mediana, mientras que los bordes inferior y superior de la caja representan el primer (25%) y tercer (75%) cuartil de los datos. Los puntos fuera de las líneas y cajas son los datos outliers.

Para el caso de las estimaciones de aptitud de café, los resultados son bastante negativos. El promedio general, es de una reducción de la aptitud de 39%. Aunque al valorar la distribución de los datos por municipios, llama la atención la dispersión considerable de estos (ver Figura 16).

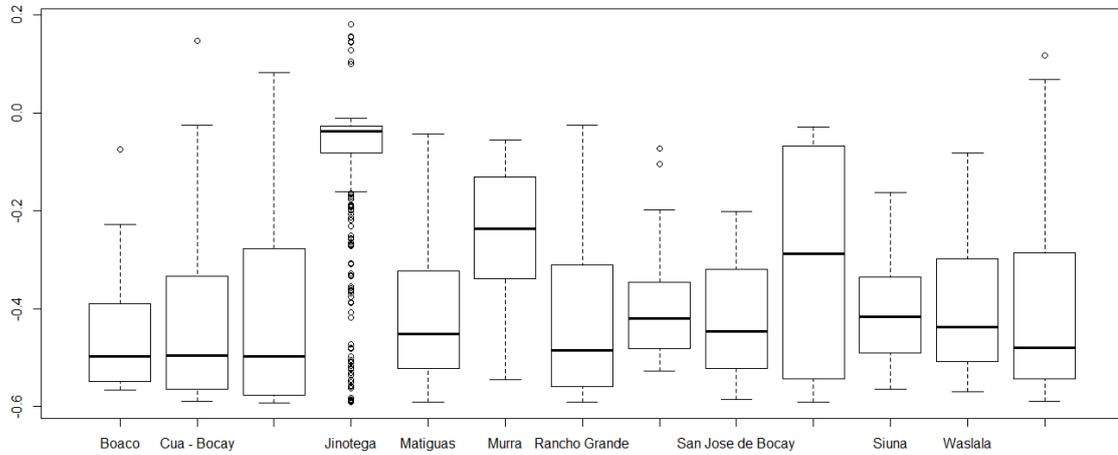


Figura 16. Cambio de aptitud de café para las zonas en común.

Al comparar el cambio de aptitud climática de café y cacao con la altitud, es notorio que la mayor pérdida de aptitud para café (ver Figura 17 a) se concentra entre los 300 – 100 msnm. Esta situación es inducida por los incrementos de temperatura de la zona, a lo cual es susceptible el cultivo del café (Läderach *et al.*, 2010). Mientras que según los resultados para el modelo Bio Prec ETP (ver Figura 17 b) no habrían cambios considerables, ni se muestra relación alguna con la altitud. Posiblemente esto sea un efecto de no incluir las variables de temperatura en el modelo. Para corregir esto, se presentan también los resultados del modelo BIO (ver Figura 17 c) para los cuáles se puede apreciar una ligera disminución de aptitud. En promedio la disminución según este último modelo sería de 2% para esta zona con altitudes menores a los 1000 msnm, pero cuando la elevación es mayor al 1100 msnm, se estima un aumento promedio de la aptitud de un 10% en municipios como Jinotega, Cua – Bocay y Wiwilí de Jinotega.

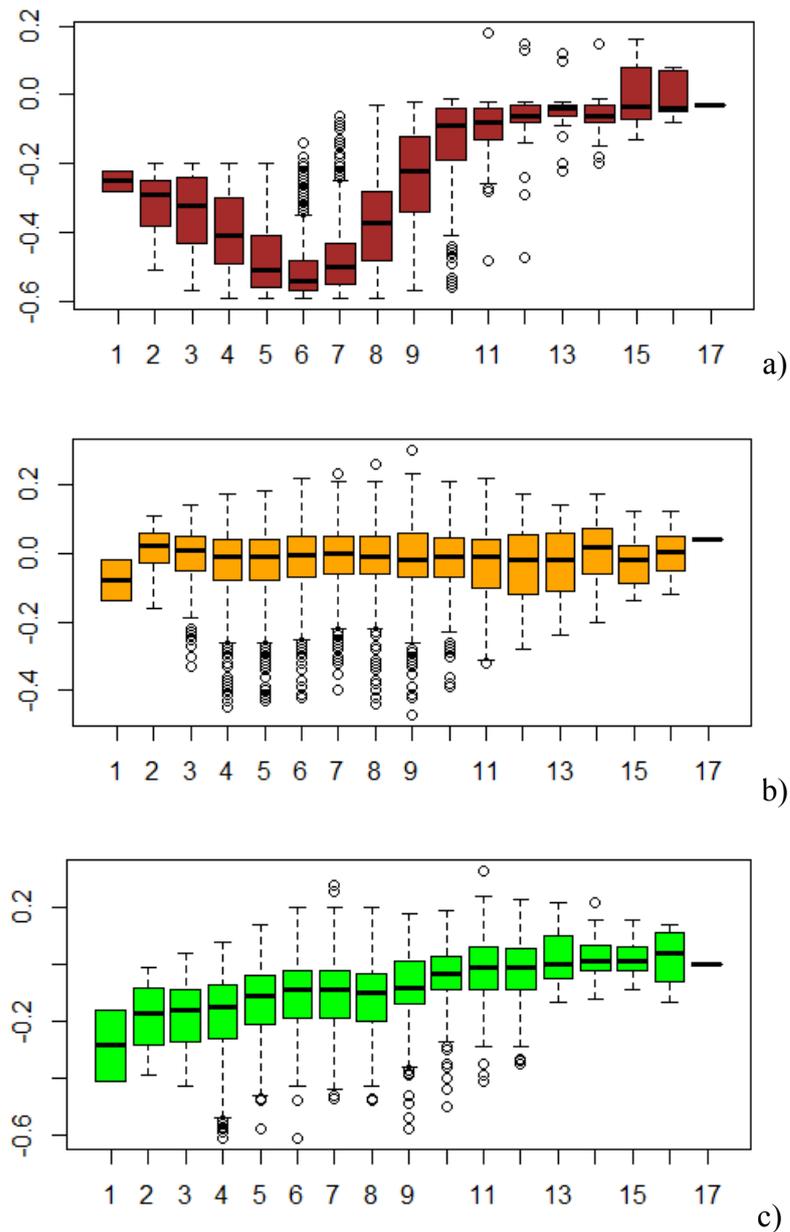


Figura 17. Comparación de la distribución de aptitud en relación con la elevación (msnm) a) la estimación de cambio de aptitud climática para café, b) para cacao según el modelo Bio Prec + ETP, y c) para cacao según modelo BIO. En el eje de las Y se muestra el cambio de aptitud y en el eje de las X el código para elevación donde 1 equivale a 100 a 199 msnm y 17 a 1700 a 1799 msnm.

3. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de MaxEnt, utilizando la base de datos climática de WorldClim y tres conjuntos de variables distintos para ajustar los modelos, para las condiciones climáticas actuales en Nicaragua las áreas óptimas para el desarrollo del cultivo de cacao están concentradas principalmente en tres zonas: (ver Figura 9)

- Centro Norte – RAAN: principalmente las áreas comprendidas entre los municipios de Waslala y Siuna.
- RAAN: entre los municipios de Rosita y Bonanza.
- RAAS: una franja ubicada entre los municipios de Kukra Hill, El Rama, Nueva Guinea y El Castillo.

Al evaluar los resultados obtenidos para los tres conjuntos de variables considerando las condiciones climáticas actuales usando el método de la valoración por sensibilidad, es decir, usando solamente datos observados de presencia como datos de prueba, el conjunto de variables Bio Prec + ETP se erigió como el que presenta los mejores resultados, con una sensibilidad de 0.96.

Aunque se usaron tres sets de variables, para dos de ellas BIO y ETP, se determinó que existe una correlación lineal en sus resultados para condiciones de clima actual. La principal diferencia entre éstas es que la segunda incluye nueve variables de evapotranspiración potencial. Estas variables de evapotranspiración fueron incluidas ya que estudios previos en algunos grandes países productores han concluido que la evapotranspiración es determinante para el desarrollo del cultivo del cacao (Anim-Kwapong y Frimpong, 2005; Läderach *et al.*, 2012). Sin embargo, para el caso de Nicaragua, estas variables de evapotranspiración no han sido tan determinantes, probablemente porque en las zonas donde se cultiva el cacao el régimen de precipitaciones es muy elevado, con acumulaciones mayores a los 2500 mm al año, por lo que el incremento de temperatura estimado por los 19 GCM para 2050, y su correspondiente influencia en la evapotranspiración potencial, podría no afectar la aptitud de las áreas para el cultivo.

De acuerdo a los resultados de MaxEnt usando las proyecciones climáticas de 19 GCMs para las condiciones climáticas futuras (2050), en el modelo de ETP se estima una pérdida de aptitud climática en general, mientras que el modelo “Bio Prec + ETP” es optimista, prediciendo ganancia de aptitud para algunas zonas principalmente comprendidas en el departamento RAAN. Dada la obvia imposibilidad de validar un modelo que usa variables de condiciones climáticas estimadas para futuro, se considera la validación de los resultados para condiciones actuales como el argumento para dar como el resultado más preciso el obtenido mediante el conjunto de variables “Bio Prec + ETP”.

En este modelo, las variables que se erigen como las más importantes para estimar el cambio de aptitud de las áreas para el cultivo de cacao en Nicaragua en el horizonte 2050 son la precipitación del trimestre más húmedo (BIO 16) y la precipitación del trimestre más seco (BIO 17), de tal manera que cuanto menos húmeda sea la zona del territorio analizado, más apta será para el cultivo de cacao.

Los conjuntos de variables BIO y ETP, que contienen variables de temperatura, estiman la influencia de éstas como negativas para la aptitud climática del cultivo del cacao. Siendo que los GCM proyectan un cambio de temperatura máxima de 31.2 °C a 33.5 °C, y que existen casos como el de las áreas de cultivo en México (Roa-Romero *et al.*, 2009) donde el cultivo se desarrolla en ambientes con temperaturas máximas de hasta 36 °C, es posible que los cambios en temperatura no sean en la realidad factores importantes de cambios para este cultivo en específico. A pesar del riesgo de esta asunción, se pone de manifiesto la limitante metodológica de los modelos de predicción de especies (Lennon, 1999) en cuanto muchas veces se supone que se usa para “X” modelo todas las variables importantes para la distribución de la especie. Como sea, esta aseveración, únicamente sería confirmada si al modelar la aptitud climática de las áreas se consideraran dos elementos: conocer las variedades usadas en cada ambiente (México, Ghana, Brasil y Nicaragua) y las condiciones climáticas en las que se desa-

rolla óptimamente cada variedad; y para efectos de este estudio tales elementos no han sido considerados, pero se identifica como una línea de trabajo a futuro.

La zona donde converge una aptitud climática para ambos cultivos mayor al 20% se encuentra entre los departamentos de Matagalpa y Jinotega. Para esta zona, se estima que el cultivo de café perdería cerca de 39% de aptitud, principalmente motivado por el incremento de temperatura. Las mayores pérdidas de aptitud se ubican entre los 300 – 1000 msnm. Para el cultivo del cacao, según las estimaciones basadas en las proyecciones de los GCMs, en lo general no se esperan cambios considerables en comparación con las condiciones actuales, excepto para la zona norte del departamento de Jinotega, donde el incremento de temperatura en la zona montañosa podría inducir un incremento de aptitud.

Siendo que el cacao es tolerante a temperaturas cálidas pero no a temperaturas por debajo de los 18 °C, y que en Jinotega hay zonas con temperaturas medias mínimas anuales están en un rango de 16 – 20 °C, un incremento de temperatura para las zonas altas por encima de los 1100 msnm podría influenciar un incremento de la aptitud. Sobre esta interrelación de incrementos de temperatura y cambios de aptitud para café (negativo) y para cacao (positivo) para determinadas áreas es necesario realizar estudios más detallados.

Estos resultados, a pesar de ser una primera aproximación en el uso de modelos para determinar la aptitud de las áreas productoras de cacao en Nicaragua, es una herramienta que permite a los tomadores de decisiones poder identificar de forma más delimitada las áreas de distribución del cultivo, y al mismo tiempo, conocer el potencial del país, lo que permitiría identificar aquellos municipios en donde se debe aplicar una política de fomento al cultivo. Los resultados han sido presentados en diferentes foros nacionales como el “V Foro Nacional: La cadena de valor de cacao y su impacto en el desarrollo rural de Nicaragua” realizado entre el 19 y 20 de septiembre de 2012, y que contó con la participación de diferentes instituciones nacionales y extranjeras relacionadas con la cadena de valor del cultivo, entre ellos el comité ejecutivo de la Mesa Nacional de Cacao.

Se espera que la expectativa creada con estos resultados permita mejorar algunos aspectos del estudio, como obtener mayor información para diferenciar los datos de presencia por variedad del cultivo, incorporar las variables de suelos (pendiente, textura, drenaje y limitantes) para poder delimitar aún más las áreas de distribución del cultivo de cacao y usar un SRES adicional (A1B) que permita medir la incertidumbre de las estimaciones a futuro relacionada con los escenarios de emisiones.

Además de poder incluir otras variables al modelo de MaxEnt, sin caer en la sobre parametrización del modelo, otra línea de trabajo a futuro bien puede ser comparar estos resultados con los de un modelo fisiológico de plantas que, como se ha indicado al inicio del trabajo, aunque requiere de mayor información y su aplicabilidad depende de la experiencia del usuario (lo que es una limitante frente a MaxEnt), podría permitir no solo el comparar los modelos, sino también complementar la información aquí obtenida tanto para la planificación del territorio como para el manejo del cultivo en sí.

BIBLIOGRAFÍA

- Anim-Kwapong, G.J. y Frimpong, E.B. (2005): Vulnerability of agriculture to climate change: Impact of climate change on cocoa production. *Cocoa Research Institute of Ghana*.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M.. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>.
- Altieri, M. A.; Funes Monzonte, F.; Henao, A.; Nicholls, C.; Sicard, T.; Vázquez, I. y Zuluaga, G. (2012): Hacia una metodología para la identificación, diagnóstico y sistematización de sistemas agrícolas resilientes a eventos climáticos extremos. REDAGRES.
<http://wp.ufpel.edu.br/consagro/files/2012/03/Hacia-una-metodolog%C3%ADa-para-la-identificaci%C3%B3ndiagn%C3%B3stico-y-sistematizaci%C3%B3n-de-sistemas-agr%C3%ADcolas-resilientes-a-eventos-clim%C3%A1ticos-extremos.pdf>
- Alvim, P. y Alvim, R. (1980): “Environmental requirements of cocoa with emphasis on responses to shade and moisture stress”. Proceeding in: *International Conference on Cocoa and Coconuts*. The Incorporated Society of Planters. Kuala Lumpur, Malaysia. pp 93–111.
- Alvim, P.; Machado A. e Granier, A. (1969): “Alguns estudos sobre as relacoes de agua, solo e crescimento do cacauero”. *Mem. Conf. Int. Pesquis. Cacau*. pp. 316–326.
- Asare, D. K.; Banini, G. K.; Ayeh, E. O. y Amenorpe G. (2011): “Estimation of potential evapotranspiration for a coastal savannah environment by comparison of different methods”. *International Journal of Sustainable Agriculture*. 3(2): 65–70.
- Baca, M.; Läderach, P.; Hagggar, J.; Ovalle, O.; Ocón, S.; Gómez, L. y Zelaya, C. (2011): “Vulnerabilidad y estrategias de adaptación al cambio climático en los medios de vida de las familias de Nicaragua”. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Managua, Nicaragua.
http://dapa.ciat.cgiar.org/wp-content/uploads/2012/05/Informe_final_de_Vulnerabilidad-CUP-NIC-2011.pdf
- BCN (Banco Central de Nicaragua). (2008): Indicadores Económicos 2001 – 2008. Managua.
- Beerling, D. J.; Huntley, B. y Bailey, J.P. (1995): “Climate and the distribution of *Fallopia japonica*: use of an introduced species to test the predictive capacity of response surfaces”. *Journal of Vegetation Science*. 6, pp. 269–282
- Blenkinsop, S. y Fowler H. (2007): “Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models”. *Journal of Hidrology* 342: 50 – 71.
- Brzeziecki, B.; Kienast, F. y Wildi, O. (1995): “Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland”. *Journal of Vegetation Science* 6: 257–268.
- Busby, J. R. (1991): “BIOCLIM—a bioclimatic analysis and prediction tool”. In: Margules, C.R., Austin, M.P. (Eds.), *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO, Melbourne, pp. 64–68.
- Carpenter, G.; Gillison, A. N. y Winter, J., (1993): “DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals”. *Biodiv. Conserv.* 2, pp. 667–680.
- CETREX (Centro de Trámite de las Exportaciones de Nicaragua). (2012):, Exportaciones periodo enero-diciembre 2011. Último acceso en mayo 2012.
<http://www.cetrex.gob.ni/website/servicios/tproduc11.jsp>
- Cowley, M. J. R.; Wilson, R. J.; León-Cortés, J. L.; Gutiérrez, D.; Bulman, C. R. y Thomas, C. D. (2000): “Habitat-based statistical models for predicting the spatial distribution of butterflies and day-flying moths in a fragmented landscape”. *Journal of Applied Ecology* 37. 60–72.

- Cuadra Cea, Luis. (1963): *Aspectos históricos de la moneda en Nicaragua*. Banco Central de Nicaragua.
- Dias L. A. S. (2001): “Genetic improvement of cacao”. FUNAPE – UFG (Foundation for Research Support – Goiás Federal University, for its acronym in Portuguese) Ecoport version by Peter Griffie, FAO. Accessed June, 2011.
<http://ecoport.org/ep?SearchType=earticleView&earticleId=197>
- Dormon, E.N.A.; Van Huis ,A.; Leeuwis, C.; Obeng-Ofori, D. y Sakyi-Dawson, O. (2004): “Causes of low productivity of cocoa in Ghana: Farmers' perspectives and insights from research and the socio-political establishment”. *Journal of Life Sciences* 52(3-4):237–259.
- Elith, J. y Leathwick, J.R., (2009): “Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time”. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40: 677–697.
- Elith, J.; Graham, C.H.; Anderson, R.P.; Dudík, M.; Ferrier, S.; Guisan, A.; Hijmans, R.J.; Huettmann, F.; Leathwick, R.; Lehmann, A.; Li, J.; Lohmann, L.G.; Loiselle, B.A.; Manion, G.; Moritz, C.; Nakamura, M.; Nakazawa, Y.; Overton, J.McC.; Peterson, A.T.; Phillips, J.; Richardson, K.; Scachetti-Pereira, R.; Schapire, E.; Soberon, J.; Williams, S.; Wisz, M. y Zimmermann, E. (2006): “Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data”. *Ecography* 29:129–151.
- Escobedo Aguilar, A. (2010): Cadena productiva de cacao en Nicaragua. CATIE.
<http://www.catie.ac.cr/BancoMedios/Documentos%20PDF/cadena%20productiva%20nicaragua.pdf>
- Evangelista, P.; Kumar, S.; Stohlgren, T.; y Young, E. (2011): “Assesing forest vulnerability and the potential distribution of pine beetles under current and future scenarios in the interior West of the US”. *Forest Ecology and Management* 262: 307–316.
- FAO. (2003): Ecocrop I and II.Revised version. Land and Water Digital Media Series 4. FAO, Rome.
- FHA (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola). (2004): “Cultivo de cacao bajo sombra de maderables o frutales”. Guía técnica. 23 p.
- Gogol-Prokurat, Melanie. (2011): Predicting habitat suitability for rare plants at local spatial scales using a species distribution model. *Ecological Applications* 21:33–47
- Gutiérrez, M. E. y Zamora S. (2010): “Evaluación del riesgo climático del Marco de Asistencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Nicaragua”. *Proyecto Integración de riesgos y oportunidades del cambio climático en los procesos nacionales de desarrollo y en la programación por países de las Naciones Unidas*. PNUD: Nicaragua.
- Hargreaves, G. H. y Allen, R. G. (2003): “History and evaluation of hargreaves evapotranspiration equation”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129 (1): 53–63.
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985): “Reference crop evapotranspiration from temperature”. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96–99.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. y Jarvis, A. (2005): “Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas”. *International Journal of Climatology* 25:1965.
- ICCO (International Cocoa Organization). (2011): “Reporte anual 2009/2010”. Londres, Inglaterra: ICCO. Último acceso en mayo 2012.
http://www.icco.org/pdf/An_report/Annual%20Report%20for%202009-2010%20-%20English-French-Spanish-Russian%20-%20final.pdf
- IPCC. (2007): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor y H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf>
- INTA (Instituto Nicaragüense de tecnología Agropecuaria). (2009): Guía tecnológica del cultivo del cacao. Edición No. 4. 41 p.

- Isaac, M. E.; Timmer, V. R. y Quashie-Sam, S. J. (2007): "Shade tree effects in an 8-year-old cocoa agroforestry system: biomass and nutrient diagnosis of *Theobroma cacao* by vector analysis". *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78:155–165.
- Jaimes, Y. y Aranzazu, F. (2010): *Manejo de las enfermedades del cacao (*Theobroma cacao* L) en Colombia, con énfasis en monilia (*Moniliophthora roreri*)*. Colombia. Corpoica. 90 p.
- Jiménez, D. (2010). "Agricultura específica por sitio compartiendo experiencias". Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. 2 p. (CIAT hoja informativa No.11). http://www.ciat.cgiar.org/Newsroom/Documents/hoja_informativa11_aesce.pdf
- Jones, J. W.; Hoogenboom, G.; Porter, C. H.; Boote, K. J.; Batchelor, W. D.; Hunt, L. A.; Wilkens, P. W.; Singh, U.; Gijsman, A. J. y Ritchie, J. T. (2003): "The DSAAT cropping system model". *Euro. J. Agronomy* 18: 23 – 265.
- Kearney, M. R. y Porter W. P. (2009): "Mechanistic niche modeling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges". *Ecology Letters* 12: 334–350
- Läderach, P., **Martínez, A.**, Schroth, G., y Castro, N. 2012. "Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producing countries, Ghana and Côte d'Ivoire". Manuscript submitted for publication.
- Läderach, P., Hagger, J., Lau, C., Eitzinger, A., Ovalle, O., Baca, M., Jarvis, A. y Lundy, M. (2010): "Mesoamerican coffee: Building a climate change adaptation strategy". CIAT, Policy Brief, 4 p.
- Läderach, P., Lundy, M., Jarvis, A., Ramírez, J., Pérez, P.E., Schepp, K., y Eitzinger, A. (2010b): "Predicted impact of climate change on coffee-supply chains". In Leal Filho, W. (ed) *The Economic, social and Political Elements of Climate Change*, Springer Verlag, Berlin. Chapter 42.
- Lennon, J. J. (1999): "Resource selection functions: taking space seriously?". *Trends in Ecology and Evolution*. 14:399–400
- Lobell D. B.; Burke M. B.; Tebaldi C.; Mastrandrea M. D.; Falcom W. P. y Naylor R. L. (2008): "Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030". *Science* 319: 607–610.
- Lybbert, T. y Sumner, D. (2010): *Agricultural Technologies for Climate Change Mitigation and Adaptation in Developing Countries: Policy Options for Innovation and Technology Diffusion*. ICTSD–IPC Platform on Climate Change, Agriculture and Trade. Issue Brief No.6. International Centre for Trade and Sustainable Development, Geneva, Switzerland and International Food & Agricultural Trade Policy Council, Washington DC, USA.
- MAGFOR (Ministerio Agropecuario y Forestal). Gutiérrez, C.; Alfaro, J.; Gutiérrez, M. y Altamirano, M. (2008): Sub-programa: Fomento de la producción, transformación y comercialización de cacao en Nicaragua. <http://www.magfor.gob.ni/prorural/programasnacionales/perfilessub/cacao.pdf>
- Meléndez, L. y Somarriba, E. (1999): "Microambiente y cantidad de esporas de *Moniliophthora roreri* en el aire bajo tres sistemas de sombra leguminosa en cacao". *Agroforestería en Las Américas* Vol. 6. 23: 39–41.
- Nix, H.A. (1986): "A biogeographical analysis of Australian elapid snakes". In: Longmore, R. (Ed.), *Atlas of Elapid Snakes of Australia*. Australian Government Publishing Service, Canberra, pp. 4–15.
- Ortega-Huerta, M. A. y Townsend, P. (2008): "Modelado de nichos ecológicos y predicción de distribuciones geográficas: comparación de seis métodos". *Revista Mexicana de Biodiversidad* 79: 205 – 216.
- Pearson, R.G. (2007): *Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners*. Synthesis. American Museum of Natural History. Available at <http://ncep.amnh.org> .
- Phillips S.T. y Dudik, M. (2008): "Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation". *Ecography*, 31: 161-175.
- Phillips, S. J.; Anderson, R. P. y Schapire, R. E. (2006): "Maximum entropy modeling of species geographic distributions". *Ecological Modelling* 190:231–259.

- Rabbinge, R. (2009): Agricultural science and technology needs for climate change adaptation and mitigation. International Food Policy Research Institute (IFPRI). 16 (2).
http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/focus16_02.pdf
- Ramirez J. y Jarvis A.. (2010). Disaggregation of Global Circulation Model Outputs.
<http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/>
- Roa-Romero, H.; Salgado-Mora, M. y Alvarez-Herrera, J. (2009): “Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal de cacao (teobroma cacao L.) en el Soconusco, Chiapas – México”. *Acta biol. Colomb.* 14: 97–110.
- Robertson, M. P.; Peter, C. I.; Villet, M. H. y Ripley B. S. (2003): “Comparing models for predicting species’ potential distributions: a case study using correlative and mechanistic predictive modelling techniques”. *Ecological Modelling* 164: 153–167.
- Rounsevell, M. D.; A.; Annetts, J. E.; Audsley, E.; Mayr, T. y Reginster I. (2003): “Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale”. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 95: 465 – 479.
- Schroth, G.; Laderach, P.; Dempewolf, J.; Philpott, S.; Hagggar, J.; Eakin, H.; Castillejos, T.; Moreno, J. G.; Soto, P. L.; Hernandez, R.; Eitzinger, A. y Ramirez-Villegas J. (2009): “Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico”. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 14: 605–625
- Schwendenmann, L.; Veldkamp, E.; Moser, G.; Holscher, D.; Kohler, M.; Clough, Y.; Anas, I.; Djajakirana, G.; Erasmi, S.; Hertel, D.; Leitner, D.; Leuschner, C.; Michalzik, B.; Propastini, P.; Tjoa, A.; Tschardtke, T. y van Straaten, O. (2010): “Effects of an experimental drought on the functioning of a cacao agroforestry system, Sulawesi, Indonesia”. *Global Change Biology* 16, 1515–1530.
- Seoane, J. y Bustamante, J. (2001): “Modelos predictivos de la distribución de especies: una revisión de sus limitaciones”. *Ecología* 15:9–21.
- Soria-Auza, R.; Kessler, M.; Bach, K.; Barajas-Barbosa, P.; Lenhert, M.; Herzog, S. y Böhner, J. (2010): “Impact of the quality of climate models for modelling species occurrences in countries with poor climatic documentation: a case study from Bolivia”. *Ecological Modelling* 221: 1221–1229.
- Tukey J.W. (1977): *Exploratory data analysis*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing.
- Wood, G. y Lass, R. (2001). *Cacao*. 4th ed. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Zhang, X.; Liu, W.; Li, Z. y Chen, J. (2011): “Trend and uncertainty analysis of simulated climate change impacts with multiple GCMs and emission scenarios”. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1297 – 1304.

ANEXOS

Anexo I: Listado de participantes en reunión de trabajo para validación.

Tabla 9. Lista de contactos participantes de la reunión de trabajo sostenida el 30 de marzo de 2012, con miembros del ejecutivo de la comisión de la mesa nacional de cacao.

No.	Nombre y Apellidos	Organización
1	Oveyda Morales Dávila	Instituto para el Desarrollo y la Democracia (IPADE)
2	Claudia E. Pineda	Lutheran World Relief (LWR)
3	Ernesto Bendaña B.	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI – Nicaragua)
4	Manuel Morales Navarro	Unión Nacional de Agricultores y Ganaderos de Nicaragua (UNAG)
5	Carolina Vega	Universidad Nacional Agraria (UNA)
6	Maribel Chamorro	Movimiento FUNDAR
7	Luis Orozco Aguilar	Federación Nacional de Cooperativas (FENACCOOP R. L)
8	Iván Marín	Laboratorio-Bio-ciencia-Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN)
9	Silvia López Rayo	Ministerio de Economía Familiar, Cooperativa, Comunitaria y Asociativa



Figura 18: Participantes de la reunión de trabajo durante la validación de los resultados para del modelo para las áreas en condiciones actuales.

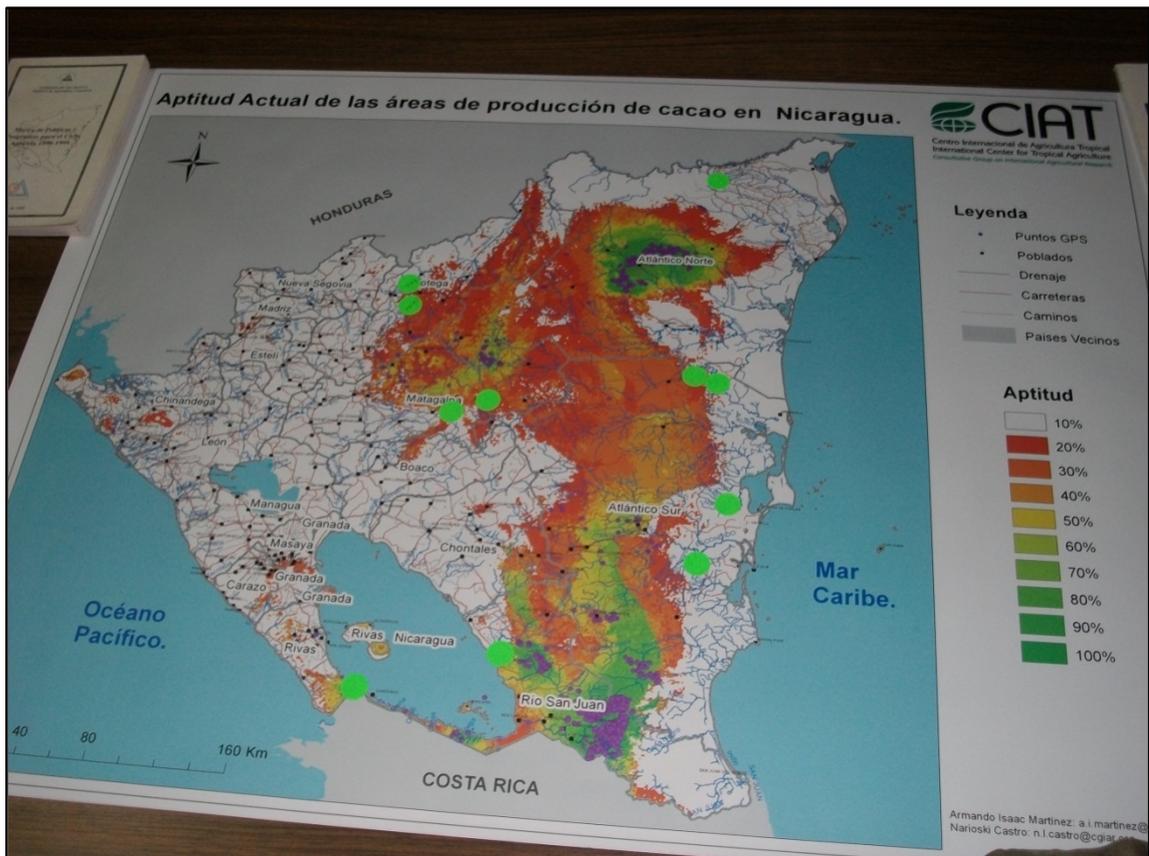


Figura 19: Mapa resultado del modelo inicial, validado en la reunión sostenida con miembros del ejecutivo de la comisión de la mesa nacional de cacao.