

VALORACIÓN DEL CAMBIO DE APTITUD DEL CULTIVO DE CAFÉ EN COLOMBIA, POR VARIACIÓN EN LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Juan Carlos García López*; Peter Läderach**; Húver Posada Suárez***

GARCÍA L., J.C.; LÄDERACH, P.; POSADA S., H.E. Valoración del cambio de aptitud del cultivo de café en Colombia, por variación en los escenarios climáticos futuros. Revista Cenicafé 69(1):91-111. 2018

Este estudio tiene como objetivo identificar cómo las regiones cafeteras colombianas estarían cambiando su aptitud actual en el marco del escenario A2 2030s y 2050s, planteados en el cuarto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático-IPCC. A partir de la información climática actual y futura se construyeron bioindicadores climáticos que constituyeron los predictores de la modelación en Maxent. La distribución de probabilidad de Maxent se definió en la zona cafetera colombiana, la aptitud climática correspondió al nivel de presencia de ciertas características climáticas que permiten satisfactoriamente el cultivo de café. La tendencia es a incrementar la expresión de Temperatura Media hacia el futuro, la mínima cantidad de incremento promedio esperada es 0,8 y 1,6°C para 2030 y 2050, respectivamente. Mayores cambios se observarán en aquellas áreas ubicadas en el Norte de Colombia mientras que las zonas con valores de cambio más reducidos corresponden al Sur de Colombia. El cambio en precipitación muestra la tendencia en la zona Caribe y Santanderes a disminuir entre 1,6% y 3,5% (30 a 64 mm). Varias zonas de menor aptitud en el escenario actual y futuro se observan en las estribaciones de las grandes montañas, con influencia de grandes cuencas hidrográficas como los ríos Magdalena, Cauca, Catatumbo, Sogamoso, Guaviare, Meta y Patía.

Palabras clave: *Coffea arabica*, Zona Cafetera Colombiana, aptitud actual.

APTITUDE CHANGE ASSESSMENT OF COFFEE CULTIVATION IN COLOMBIA BY VARIATION IN FUTURE CLIMATE SCENARIOS

This study aims to identify how Colombian coffee regions would be changing their current aptitude under the A2 2030s and 2050s scenarios, reported in the Fourth Assessment Report of IPCC of the Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. Climatic bioindicators, which were the predictors of the Maxent modeling were made using current and future climate data. The Maxent probability distribution was defined in the Colombian coffee region, the climate aptitude corresponded to the level of presence of certain climatic characteristics that satisfactorily allow the cultivation of coffee. The tendency is to increase the expression of Average Temperature towards the future, the minimum amount of expected average increase is 0.8 and 1.6 ° C for 2030 and 2050, respectively. Major changes were identified in the North of Colombia, while areas with smaller change values correspond to the South of Colombia. The change in precipitation shows that the Caribbean and the Santander areas have a tendency to decrease from 1.6% to 3.5% (30 to 64 mm). Several areas of lower aptitude in the current and future scenario are observed in the foothills of the great mountains, with the influence of large river basins such as the Magdalena, Cauca, Catatumbo, Sogamoso, Guaviare, Meta and Patía rivers.

Keywords: *Coffea arabica*, Colombian coffee regions, current aptitude.

*Investigador Científico II, Disciplina de Agroclimatología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

**Decision and Policy Analysis (DAPA), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia.

***Gerencia Técnica, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Bogotá, Colombia.

Los informes cuarto y quinto del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (por sus siglas en inglés, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), concluyeron que no existen dudas de que la humanidad se afectará por el cambio climático (23, 24), con aumentos más marcados en la temperatura hacia latitudes septentrionales altas. En el quinto informe del IPCC (24) se advierte cómo cada uno de los tres últimos decenios han sido sucesivamente más cálidos en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior, desde 1850.

De acuerdo con la segunda comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (20), para Colombia el análisis de tendencia de aumento de temperatura evidencia una tasa de calentamiento promedio de 0,13°C por década en los últimos 50 años, y una tasa de disminución de la precipitación entre -3,1 y -4,0 mm.año⁻¹. Por su parte, los resultados según la tercera comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (19) muestran cómo los aumentos de temperatura y el comportamiento de la precipitación no será el mismo en todas las regiones, con tendencia al incremento gradual de temperatura esperado de 2,14°C hacia 2070, y la disminución de la precipitación en departamentos del Norte de Colombia y aumento de las lluvias en el Centro, Sur y Occidente del país.

En los últimos años, Colombia ha registrado eventos críticos relacionados con la ocurrencia de los eventos La Niña y El Niño, el primero relacionado con incremento de la pluviosidad entre los años 2007 y 2011, recrudescida entre los años 2008 y 2010, la cual no sólo afectó a la población sino a los cultivos, entre ellos el café. En este último se generaron condiciones favorables

para el desarrollo de la roya del café, que registró niveles de infección del 44% (42), lo cual disminuyó la productividad, que en el año 2011 se situó en 7.654 millones de sacos (43). El segundo, el evento El Niño, que se registró entre los años 2015 y 2016, considerado el de mayor efecto climático en término de déficit de lluvias para la región Andina y Caribe, y el segundo más intenso desde 1950. El 80% de las zonas en la región Andina tuvieron anomalías en los valores de temperatura, superiores a los 2,5°C (21). La caficultura colombiana sufrió los efectos de dicho fenómeno, que para el segundo semestre del año 2015 afectó el 18% del total del parque cafetero (14) y en 2016, de acuerdo con un estudio riguroso de las instituciones cafeteras del sector, determinó que 469.000 caficultores y 693.000 hectáreas presentarían algún tipo de afectación (37).

Estudios realizados en Centro América, Sur América y Centro de África, con el fin de predecir los efectos del cambio climático en las cadenas de suministro de café (4, 8, 10, 32, 33, 34, 36, 48), entre otros aspectos, demuestran que se registrarán cambios considerables en calidad; muchas regiones donde se cultiva de forma tradicional el café perderán aptitud y surgirán nuevas zonas, con desplazamiento hacia zonas de mayor altitud. El clima tenderá a la estacionalidad, con variaciones en la temperatura y la precipitación a través del año, la primera con incrementos y la segunda con disminución; pero no sólo son las tendencias en cuanto a los cambios, sino las estrategias que se plantean para mitigarlos. Los mismos autores advierten de la necesidad de fortalecer la investigación que les permita a los cafeteros adaptarse a esos nuevos ambientes, que los actores de toda la cadena inviertan más en redes colaborativas y compartan el conocimiento, de manera que aseguren su permanencia en el negocio. De otro lado, la mayor parte de las plantas se estarán

cultivando en condiciones desfavorables para su crecimiento y desarrollo, lo que implica pérdidas en el potencial genético para la producción bajo condiciones de estrés (47).

En Colombia, los estudios en café muestran cómo de forma recurrente se presentan los eventos El Niño y La Niña, este último con menor frecuencia. Durante las fases de los dos eventos, los vientos Alisios disminuyen o aumentan su intensidad, y la superficie de las costas de Perú, Ecuador y Colombia se calientan o enfrían (12, 25, 26). Dichos eventos originan que los regímenes de lluvia no sigan un patrón normal, con déficits o incrementos entre un 20% y 40% (52).

El panorama futuro plantea un reto al gremio cafetero y, en especial, el direccionamiento de los temas de investigación, es por esta razón que en este estudio se busca identificar cómo las regiones cafeteras colombianas estarán cambiando su aptitud actual, en el marco del escenario futuro (A2), proyectado a 2030 y 2050, teniendo como base los Indicadores Bioclimáticos identificados como predictores de respuestas fenotípicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del clima actual de la Zona Cafetera Colombiana (ZCC)

La línea base climática se obtuvo de los datos de clima históricos de *WorldClim* (18), generados mediante procesos de interpolación de datos climáticos mensuales promedio, a 5,0 km de resolución. La base de datos incluye para Colombia 1.491 estaciones meteorológicas, de las cuales el 35% se encuentran dentro de la zona cafetera, 528 con precipitación, 212 para temperatura media y 95 para temperatura máxima y mínima. Las variables derivadas de la temperatura y precipitación mensual se obtuvieron de base *WorldClim*, adaptadas a

etapas fenológicas del cultivo. Otros indicadores bioclimáticos se construyeron con base en las mismas variables, y en otras modeladas a partir de fórmulas propias o propuestas por diferentes autores.

Caracterización del clima futuro de la Zona Cafetera Colombiana

Modelos de Circulación Global (GCMs).

Las condiciones de clima proyectado para la ZCC para los periodos 2030 y 2050 fueron derivadas de 19 GCMs, en el escenario de emisiones (SRES) A2, definidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en el informe especial sobre escenarios de emisiones (22): bccr_bcm2_0, cccma_c3_1_t47, cnrm-cm3, csiro_mk3_0, csiro_mk3_5, gfdl_cm2_0, gfdl-cm2_1, giss-model-er, ing-echam4, inm_cm3_0, ipsl-cm4, miroc3_2_dres, miub_echo_g, mpi_echam5, mri_cgcm2_3_2a, ncar_ccsm3_0, ncar-pcm1, ukmo_hadcm3 y ukmo_hadgem1.

Escenario de emisión. Los escenarios de emisión comprenden tanto las fuerzas que rigen las emisiones como las metodologías. Estos cambios conciernen, por ejemplo, a la intensidad en carbono del suministro de energía, a la desigualdad de ingresos entre los países desarrollados y los países en desarrollo y a las emisiones de azufre (22).

El tema subyacente al escenario A2, que se utilizó en esta modelación, es la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Pautas de fertilidad en las regiones convergen muy lentamente y la población aumenta progresivamente. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y per cápita, el crecimiento económico y el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas. El escenario asume un incremento del CO₂ (22).

Resolución espacial de los GCMs. Para análisis de impactos en la caficultura colombiana, en la mayor parte de los casos, la resolución espacial supera los 100 km, lo cual dificulta un análisis en zonas montañosas como la región objeto de este estudio. La información con resolución de 5 km fue obtenida en el CIAT, a partir de la base de datos generada como producto de la reducción de escala, mediante el Método Delta propuesto por Ramírez y Jarvis (49). El conjunto de datos comprende cuatro variables a un intervalo de tiempo mensual, promedios de temperatura media, máxima, mínima, radiación solar y precipitación total.

Validación de la información de las variables climáticas en los GCMs. De manera previa se definieron unos parámetros de restricción de las variables, soportados en la información de distribución del cultivo del café en Colombia. Se tuvieron en cuenta los datos climáticos observados en el período 1971 a 2010, en 80 estaciones de la Red Climática Cafetera y se definió que para el área en el entorno de la Zona Cafetera Colombiana un GCM en su línea base no debía presentar:

- 10% de los datos o más con amplitud térmica $\leq 4^{\circ}\text{C}$ o amplitud térmica $\geq 17^{\circ}\text{C}$
- 15% de los datos o más con temperatura media $\leq 16^{\circ}\text{C}$ o temperatura media $\geq 25^{\circ}\text{C}$
- 10% o más de los datos con radiación solar $\leq 8,6 \text{ Mjoul.m}^2\text{-día}^{-1}$ o radiación solar $\geq 23 \text{ Mjoul.m}^2\text{-día}^{-1}$

Con base en el anterior criterio, seis modelos del escenario A2 presentaron valores restrictivos, que obligaron a eliminarlos de los

análisis de aptitud, éstos fueron: ncar-pcm1, ing-echam4, cnrm-cm3, ipsl-cm4, gfdl-cm2_1 y giss-model-er.

Información de Predios Cafeteros. EL SIC@ forma parte de la infraestructura de datos de la Federación Nacional de Cafeteros, es una base de datos única, georreferenciada y de cobertura nacional, que posee información espacial y alfanumérica (13). Se utilizó para el presente estudio la versión de SIC@ de junio del año 2012; en total, para el análisis se extrajo la georreferenciación de un lote de café por cada una de 705.000 fincas cafeteras, en 20 departamentos cafeteros. Se asociaron a cada finca los atributos de departamento, municipio, área total, área cafetera, área del cultivo, ecotopo cafetero¹ y vertiente.

Datos fenológicos

Información de patrones de cosecha. A partir de trabajos previos (2), se generó un ráster de cosechas ajustado a la zona cafetera, con dos criterios: cosecha principal predominante en el segundo semestre (entre julio y diciembre) y cosecha principal predominante en el primer semestre (entre enero y junio). Estos criterios se utilizaron en la construcción de las etapas fenológicas del cafeto. Se presumió, para efectos de consolidar las etapas, que octubre y mayo corresponden al mes de cosecha principal (mes pico de máxima producción) en zonas con patrón de cosecha en el segundo y primer semestre, respectivamente.

Períodos de consolidación y momentos fenológicos. Se definieron tres momentos fenológicos previos al mes de cosecha principal, con el fin de relacionarlos con los índices bioclimáticos, éstos son:

¹ Región delimitada geográficamente, teniendo en cuenta condiciones predominantes de clima, suelo y relieve, donde se obtiene una respuesta biológica similar del cultivo de café (16).

a. Cuatro meses previos a la máxima floración, en adelante se denominará etapa 1 (1, 6).

b. Cuatro primeros meses de desarrollo del fruto de cosecha principal, en adelante se denominará etapa 2 (1, 3).

c. Cuatro meses previos a la cosecha principal, en adelante se denominará etapa 3 (1, 3).

Obtención de los indicadores bioclimáticos.

Para cada uno de los modelos de cada escenario futuro y para el escenario actual (línea base) se calcularon diferentes índices, los cuales al combinarse con los estados fenológicos permitieron un análisis de la variabilidad interanual, de relevancia en el cultivo del café.

Índice de Evapotranspiración. Para el cálculo del balance hídrico mensual se adaptó la rutina en R (54) generada por García (15). Se tuvieron constantes los valores de lluvia efectiva y capacidad de retención de humedad, el primero con 54% (30) y el segundo de 50 mm, utilizado en las rutinas para el balance hídrico de la Disciplina de Agroclimatología de Cenicafé. Al final de la rutina se obtuvo el índice de evapotranspiración (IHS). El Déficit Hídrico Moderado (DM) se constituyó en el rango $0,5 \leq IHS \leq 0,8$, mientras el déficit Hídrico Fuerte (DF) se estableció cuando el $IHS < 0,5$. En cada etapa se contabilizaron, de manera independiente, los meses que cumplieran con los criterios de los dos índices, además de la lluvia acumulada (PP), generando los siguientes indicadores bioclimáticos:

PP1 = lluvia acumulada etapa 1

PP2 = lluvia acumulada etapa 2

PP3 = lluvia acumulada etapa 3

DM1 = número de meses con déficit hídrico moderado en la etapa 1

DM2 = número de meses con déficit hídrico moderado en la etapa 2

DM3 = número de meses con déficit hídrico moderado en la etapa 3

DF1 = número de meses con déficit hídrico fuerte en la etapa 1

DF2 = número de meses con déficit hídrico fuerte en la etapa 2

DF3 = número de meses con déficit hídrico fuerte en la etapa 3

Radiación solar. A partir de los valores mensuales se obtuvo el promedio por cada etapa en $Mjoul.m^{-2}.día^{-1}$ y se generaron los siguientes indicadores:

SR1 = promedio mensual de radiación solar etapa 1

SR2 = promedio mensual de radiación solar etapa 2

SR3 = promedio mensual de radiación solar etapa 3

Índices Térmicos. A partir de la información de las temperaturas máxima ($T_{máx}$), mínima ($T_{mín}$) y media (T_{media}) mensuales, tanto para la línea base como para los GCMs, y con la temperatura base inferior (T_{base}) de $10^{\circ}C$, determinada por Jaramillo y Guzmán (27) para el café en Colombia, se generaron los índices de amplitud térmica (AT) o gradiente térmico ($T_{máx} - T_{mín}$), y el de tiempo térmico (TT) o grados/día ($(T_{media} - T_{base}) \times \text{Número de días del mes}$). Para cada una de las tres etapas fenológicas propuestas se acumuló el TT (51) y se obtuvo el promedio mensual de la AT. Se generaron los siguientes índices bioclimáticos:

TT1 = tiempo térmico acumulado etapa 1

TT2 = tiempo térmico acumulado etapa 2

TT3 = tiempo térmico acumulado etapa 3

AT1 = promedio mensual de AT en la etapa 1

AT2 = promedio mensual de AT en la etapa 2

AT3 = promedio mensual de AT en la etapa 3

Incorporación de los índices bioclimáticos a las bases. Además de los 18 índices bioclimáticos construidos, a cada uno de los 5.141 centroides de la máscara cafetera obtenida en el entorno de los ecotopos cafeteros se asoció el componente fisiográfico de pendiente, incorporándose así 19 atributos para cada pixel, además de los correspondientes a su georreferenciación.

Predicción de aptitud del cultivo.

Generalmente, los modelos fisiológicos integran respuestas de los cultivos a cambios ambientales y complejas interacciones que permiten su parametrización, y de esta manera determinar los factores que afectan el crecimiento y producción. Recientemente se mencionan modelos en café (40, 55, 56), los cuales incluyen varios de los aspectos mencionados. El interés no es abordar con un nivel de detalle la obtención de un modelo para café sino, soportados en la metodología que se describe por diferentes autores (35, 36, 44, 48, 53), utilizando un modelo de Nicho Ecológico como MAXENT, partir de la información de la distribución actual del cultivo (datos de presencia) y estimar una probabilidad de distribución. La información disponible de la distribución objeto de estudio, por sí misma presenta un conjunto de valores reales, llamados entidades o elementos, y las restricciones son los valores esperados de cada entidad, que deben coincidir con su promedio empírico (45, 46). Típicamente habrá muchas distribuciones que satisfagan esas restricciones, el principio de Máxima Entropía sugiere que, dentro de todas las distribuciones que satisfagan esas restricciones, se prefiere la más ajustada (45, 46). En este caso la modelación se enmarca en el área cafetera colombiana, sobre la cual la distribución de probabilidad de Maxent es definida, los píxeles con registro de distribución

de predios cafeteros se constituyen en los puntos de muestreo y los bioindicadores, pendiente del terreno y sus funciones, en las entidades.

La probabilidad de distribución es la suma de cada variable ponderada, dividida por una constante escalar para asegurar que los valores de probabilidad fluctúen entre 0 y 1, de otra manera, Maxent asigna una probabilidad no negativa a cada pixel en el área de estudio, debido a que esas probabilidades deben sumar uno (11, 45). El programa comienza con una distribución de probabilidad uniforme e iterativamente altera un peso a la vez, para maximizar la probabilidad de alcanzar la distribución de probabilidad óptima. Con el software Maxent (versión 3.3.3k²), de manera preliminar, se establecieron las interacciones entre los puntos de muestra, 500 predios cafeteros, y sus condiciones bioclimáticas; posteriormente, las mismas interacciones se proyectaron con cada una de las superficies climáticas, de cada uno de los modelos para cada escenario.

Se consideró el 25% de los registros como muestra para pruebas que utilizan el concepto de Curva Operada por el Receptor, que permite cuantificar la sensibilidad y especificidad. La primera corresponde a la fracción de todas las instancias positivas que son ciertas, se conoce como la tasa de verdaderos positivos y representa la ausencia de error de omisión; la segunda, corresponde a todas las instancias negativas que son falsas, a partir de ésta se determina, por la cantidad de 1-especificidad, la tasa de falsos positivos y representa la presencia de error (45).

La aptitud climática corresponde al nivel de presencia de ciertas características

² www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent

climáticas que permiten satisfactoriamente el cultivo de café, deducido a partir de los controladores climáticos o bioindicadores que prevalecen en los sitios definidos en el entorno de la zona cafetera colombiana, descritos con anterioridad. El cálculo del cambio de aptitud se obtuvo por diferencia entre las aptitudes de cada uno de los escenarios futuros y la línea base, luego se obtuvo el promedio del cambio en aptitud de todos los GCMs por cada pixel dentro de la máscara cafetera, como medida de la tendencia general y distribución geográfica de la variabilidad entre GCMs.

El grado de concordancia entre los cambios de aptitud predichos se estimó como el porcentaje de los GCMs que predicen cambios en la misma dirección que el promedio de todos los modelos para un centroide dado.

RESULTADOS

Descripción de la información climática de los GCMs. La tendencia general es a incrementar la expresión de temperatura media hacia el futuro, con mayor proyección hacia el año 2050, donde se observan valores máximos de 2,5°C, mientras que en el año 2030 corresponde a la mitad de este valor. La información que se recoge de las diferencias en comportamiento por zona cafetera a nivel departamental, muestra que la mínima cantidad de incremento promedio esperado es 0,8 y 1,6°C para los años 2030 y 2050, respectivamente. La tendencia de mayores cambios se observa en aquellas áreas ubicadas en el Norte y Oriente de Colombia, a su vez las zonas con valores de incremento más reducidos predominan en el Sur de Colombia (Tabla 1).

Los incrementos de TT oscilan entre 120 y 230 grados/día acumulados por etapa para los años 2030 y 2050, respectivamente,

con máxima expresión en la zona Norte de Colombia, por su mayor incremento en temperatura media.

Para el caso de la lluvia, en la Etapa 1 se registrarán los mayores incrementos más acentuados hacia el año 2050; para esta etapa los mayores cambios positivos se registrarán entre las zonas cafeteras de los departamentos del Sur de Colombia y el Piedemonte Llanero (Tabla 1), hasta la zona Centro del Valle del Cauca, la zona Norte de Tolima y el Sur de Cundinamarca.

La condición de comportamiento de la lluvia se modifica hacia las etapas 2 y 3, que corresponden al desarrollo del fruto, en las cuales se presentará disminución de la lluvia en la zona del Norte de Colombia y algunos departamentos del Oriente (Tabla 1). El incremento de las lluvias se observa más acentuado hacia el sur y centro-sur de Colombia.

A partir de los balances hídricos realizados para cada escenario pueden establecerse los cambios estacionales para cada zona cafetera. Anteriormente se mencionó cómo la lluvia se incrementará en la etapa 1 en algunas zonas cafeteras del Sur de Colombia, no obstante, los balances hídricos en la situación actual, en regiones del Piedemonte Llanero, Sur del Huila y Centro del Tolima muestran un acumulado de al menos tres meses con DF y DM en esta etapa y se le sumarían al menos dos meses más en las siguientes dos etapas, situación que define restricciones para el cultivo y en el futuro no cambiarían. Similar situación se presenta en las zonas cafeteras del Norte de Colombia entre Noroccidente de Santander, Norte de Santander, Cesar, La Guajira y Magdalena, en las cuales predominan los DM y el acumulado anual de meses con déficit hídricos supera los siete meses; la situación más crítica se presenta las zonas

Tabla 1. Cambios proyectados en precipitación y temperatura en escenarios futuros A2 2030 y A2 2050, en las zonas cafeteras de Colombia.

Departamento	Zona Cafetera	Cambios proyectados Escenario A2 2030				Cambios proyectados Escenario A2 2050			
		Cambio en los niveles de lluvia por etapa (mm)			Incremento en la temperatura media anual en °C	Cambio en los niveles de lluvia por etapa (mm)			Incremento en la temperatura media anual en °C
		Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3		Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	
Cesar	Norte	5	-17	-25	1,15	4	-29	-35	2,22
La Guajira	Norte	4	-15	-27	1,09	0	-24	-39	2,02
Magdalena	Norte	3	-12	-26	1,11	-1	-22	-43	1,90
Norte de Santander	Norte	10	-22	-24	1,12	11	-28	-23	2,33
Santander	Norte	18	-23	-24	1,06	22	-39	-17	2,19
Boyacá	Oriente	22	-22	-28	1,04	34	-40	-11	2,11
Caquetá	Oriente	24	13	0	0,99	53	12	31	1,97
Casanare	Oriente	22	-30	-34	1,09	27	-61	-30	2,29
Meta	Oriente	20	-11	-20	1,01	46	-19	6	2,01
Antioquia	Centro	4	11	21	1,00	13	14	38	1,94
Caldas	Centro	10	22	24	0,97	27	21	43	1,83
Chocó	Centro	-1	19	14	0,98	10	13	27	1,79
Cundinamarca	Centro	16	-6	-17	0,99	39	-1	-3	1,95
Quindío	Centro	20	23	17	0,98	39	23	22	1,75
Risaralda	Centro	6	25	19	0,98	21	20	32	1,77
Tolima	Centro	21	19	13	0,97	46	23	23	1,82
Valle del Cauca	Centro	14	20	13	0,97	31	21	20	1,73
Cauca	Sur	20	21	12	0,95	46	33	17	1,80
Huila	Sur	24	19	6	0,96	56	26	22	1,90
Nariño	Sur	15	18	18	0,94	41	30	18	1,81

Cambios en niveles de lluvia

■ Disminución en más de 20 mm
 ■ Variación entre -20 y 20 mm
 ■ Aumento en más de 20 mm

Cambios en temperatura

■ Aumento inferior a 1°C
 ■ Aumento entre 1°C y 1,5°C
 ■ Aumento entre 1,5°C y 2,1°C
 ■ Aumento superior a 2,1°C

hacia el Noroccidente de Santander, Norte y Centro-Oriente de Norte de Santander y Sur de Cesar, dado que la condición de dos meses con déficit en cada una de las etapas dos y tres, restringe al cultivo, aún en la situación futura en la que tienden a disminuir ligeramente los meses con DF.

Contrario a lo anterior, otras zonas cafeteras presentan un reducido número de meses con DF y DM en la Etapa 1, las cuales predominan con cultivos en zonas de mayor altitud y adicionalmente reflejan hoy en día TT inferiores o cercanos a 1.000°C por etapa, que le confieren limitación por su crecimiento y desarrollo reproductivo.

Predicciones de aptitud del cultivo del café. Los resultados de Maxent reflejan un desempeño medio con unos valores de área bajo la curva (AUC Kappa) entre 0,492 para los datos de prueba (25%) y 0,775 para los datos de entrenamiento (75%). Los resultados de la significancia estadística de la predicción, que usan una prueba binomial de omisión, mostraron tasas bajas, sin exceder más del 10% para el Escenario A2, con un umbral acumulado de 10%.

Los resultados de Maxent muestran una condición actual de aptitud entre muy buena y excelente, mayor al 50%, para el 52% del cultivo de café en Colombia; hacia el futuro se verán afectadas, con cambios superiores al 10%, 187 mil hectáreas en el año 2030 (datos no mostrados) y 312 mil hectáreas en el año 2050 (Tabla 2).

Las hectáreas con aptitud actual media y baja, por debajo de 50%, según la calificación de Maxent, representan las zonas ubicadas a mayor altitud y en la zona Norte de Colombia, con limitaciones térmicas o de déficit hídrico. Hacia el futuro la aptitud permanece inalterada o el cambio es inferior

al 10%, en más del 95% del área de las zonas ubicadas a mayor altura y más del 85% de la Zona Cafetera de Cesar, La Guajira y Magdalena, mientras las zonas cafeteras entre el Suroccidente de Santander, Oriente de Antioquia y Caldas, Noroccidente de Cundinamarca, Norte del Tolima y Suroccidente de Huila, progresivamente cambiarán negativamente, por lo menos el 46% de sus áreas, en más del 10% respecto del año 2050, siendo más crítico para la zona cafetera del Oriente de Antioquia y Caldas y Noroccidente de Cundinamarca, con influencia del valle medio del Magdalena. En la Tabla 2 se observa por departamento cafetero, la proporción de pérdida de aptitud en el año 2050.

En la Figura 1 se presenta la condición de aptitud presente, futuro del año 2030 y futuro del año 2050. Algunas tendencias se visualizan en los mapas: varias zonas de menor aptitud (menor del 30%) se observan en las estribaciones de las grandes montañas; en la Sierra Nevada de Santa Marta, sobre los ecotopos 401 y 402 en Cesar y Magdalena y en la Serranía de Perijá, en los departamentos de Cesar y Norte de Santander; en las cordilleras propiamente, sobre el ecotopo 301A en Cesar, La Guajira y Norte de Santander, el ecotopo 306A en Santander, 302B en Norte de Santander, 305B en Boyacá y Casanare, 308B en Cundinamarca y Meta, 102B, 201A, 204A y 205B en Antioquia, 108B en Valle del Cauca y Risaralda, 107B en Caldas, 317A en Huila y Tolima, 214A en el Valle del Cauca y 209B en Tolima. Se observa gran influencia en estas zonas de las grandes cuencas hidrográficas de los ríos Magdalena, Catatumbo, Sogamoso, Guaviare y Meta.

Maxent proporciona información de las variables que tienen mayor representatividad en el modelo que más se ajusta a la condición

Tabla 2. Aptitud Actual y cambio futuro en los departamentos cafeteros, para el escenario A2 en el año 2050.

Aptitud actual	<30%				≥30% y <50%				≥50%				Porcentaje del área nacional		
	>20% y <=30%	>10% y <=20%	>0% y <=10%	Sin cambio	>20% y <=30%	>10% y <=20%	>0% y <=10%	Sin pérdida	>20% y <=30%	>10% y <=20%	>0% y <=10%	Sin cambio			
Antioquia	0,1%	11,8%	5,7%	3,5%	1,9%	22,1%	11,7%	2,4%	5,1%	0,9%	7,1%	15,0%	11,7%	1,0%	14,3%
Boyacá	0,0%	5,8%	6,6%	4,0%	0,0%	9,9%	14,8%	19,3%	15,8%	0,7%	4,2%	14,9%	4,0%	0,0%	1,2%
Caldas	0,0%	2,9%	2,6%	6,1%	0,9%	11,4%	7,2%	2,9%	8,9%	2,4%	17,2%	14,5%	15,1%	7,7%	8,6%
Caqueta	0,0%	4,2%	8,6%	2,5%	1,1%	16,6%	18,2%	6,2%	16,0%	3,1%	4,6%	9,9%	7,6%	1,2%	0,4%
Casanare	0,0%	0,9%	15,8%	83,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%
Cauca	0,0%	0,3%	0,6%	2,8%	0,6%	2,3%	0,1%	1,1%	4,6%	15,1%	22,9%	33,5%	12,1%	4,1%	8,8%
Cesar	0,7%	10,6%	16,3%	26,3%	0,1%	6,8%	17,9%	18,0%	0,7%	2,5%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	2,8%
Chocó	0,0%	0,0%	0,0%	33,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	33,5%	33,6%	0,0%	0,0%
Cundinamarca	0,0%	5,1%	4,5%	6,8%	1,7%	16,0%	25,0%	8,5%	3,2%	3,9%	13,2%	9,7%	2,5%	0,0%	4,7%
Huila	0,1%	0,6%	1,8%	2,3%	0,6%	2,3%	3,3%	5,8%	8,5%	9,3%	18,9%	11,2%	25,4%	9,9%	14,3%
La Guajira	0,0%	2,9%	22,7%	28,2%	0,0%	2,3%	11,4%	7,0%	25,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%
Magdalena	0,0%	5,2%	7,3%	7,9%	0,0%	4,4%	28,4%	24,9%	11,8%	0,0%	3,4%	2,2%	4,5%	0,0%	2,1%
Meta	0,0%	11,2%	63,9%	0,4%	1,1%	8,7%	8,9%	5,6%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%
Nariño	0,0%	0,8%	0,3%	6,2%	0,4%	0,7%	2,5%	9,9%	6,0%	14,7%	17,3%	26,6%	14,6%	0,2%	3,9%
Norte de Santander	0,2%	11,1%	11,9%	22,3%	0,0%	13,0%	10,4%	11,7%	7,1%	2,5%	8,2%	0,9%	0,6%	0,0%	3,5%
Quindío	0,0%	0,0%	0,1%	5,9%	1,8%	19,2%	0,5%	0,0%	6,7%	2,0%	6,0%	33,2%	24,2%	0,4%	3,3%
Risaralda	0,0%	2,1%	3,1%	2,5%	1,6%	8,0%	3,4%	1,1%	7,5%	0,0%	19,9%	19,6%	31,0%	0,1%	5,7%
Santander	0,0%	4,0%	7,7%	5,4%	1,4%	6,8%	12,0%	26,0%	7,0%	7,8%	3,2%	11,9%	6,8%	0,0%	4,9%
Tolima	0,0%	2,2%	3,9%	4,5%	0,8%	7,8%	12,2%	3,1%	9,5%	7,4%	10,3%	12,0%	20,9%	5,3%	12,0%
Valle del Cauca	0,0%	5,8%	5,4%	4,7%	1,9%	5,8%	14,7%	3,0%	10,0%	3,7%	8,9%	21,5%	13,5%	0,9%	8,1%

En rojo se resaltan las mayores pérdidas, superiores al 10%. En azul, los valores con pérdidas inferiores a 10%. En verde se destacan las mayores proporciones que no sufrirán cambio negativo

de la caficultura colombiana. Los indicadores con mayor contribución porcentual al modelo se relacionan con el TT, en cualquiera de sus etapas, DM2, PP3 y SR2. En las rutinas adicionales de contribución y permutación (jackknife) que ejecuta Maxent, el modelo cada vez excluye un bioindicador y crea un modelo con los restantes; los mayores valores de permutación se consiguen con TT1 y SR2; en estas pruebas adicionales una ganancia negativa se relaciona con AT2 y AT3, lo cual determina que no sean buenos predictores de distribución.

Predicción de cambio de aptitud. La incertidumbre de la predicción de cambio de aptitud entre el presente y el Escenario A2 2030 presentó niveles aceptables (Figura 2), los mayores niveles de certidumbre, superiores a 70%, se registran en 500 mil hectáreas sobre la Sierra Nevada de Santa

Marta hacia el Magdalena, Serranía de Perijá sobre Cesar, Piedemonte Llanero hacia Meta y Caquetá, Centro y Norte de Huila, Suroriente del Valle del Cauca y Noroccidente de Antioquia, principalmente.

Los mapas de la Figura 2A, 2B y 2C representan los cuartiles 1, 2 y 3, respectivamente; la tendencia en el cambio muestra zonas con valores negativos y positivos; los primeros, con pérdidas superiores al 10% de la aptitud en más del 40% de su área actual, tienden a concentrarse en Antioquia, Cauca, Cundinamarca, Quindío y Nariño.

La mayor parte de los departamentos experimentarían cambios negativos inferiores al 10%, destacándose los departamentos de Chocó, Meta y Risaralda, con más del 60% de sus áreas en esta condición. Por su parte, los departamentos que ganarán

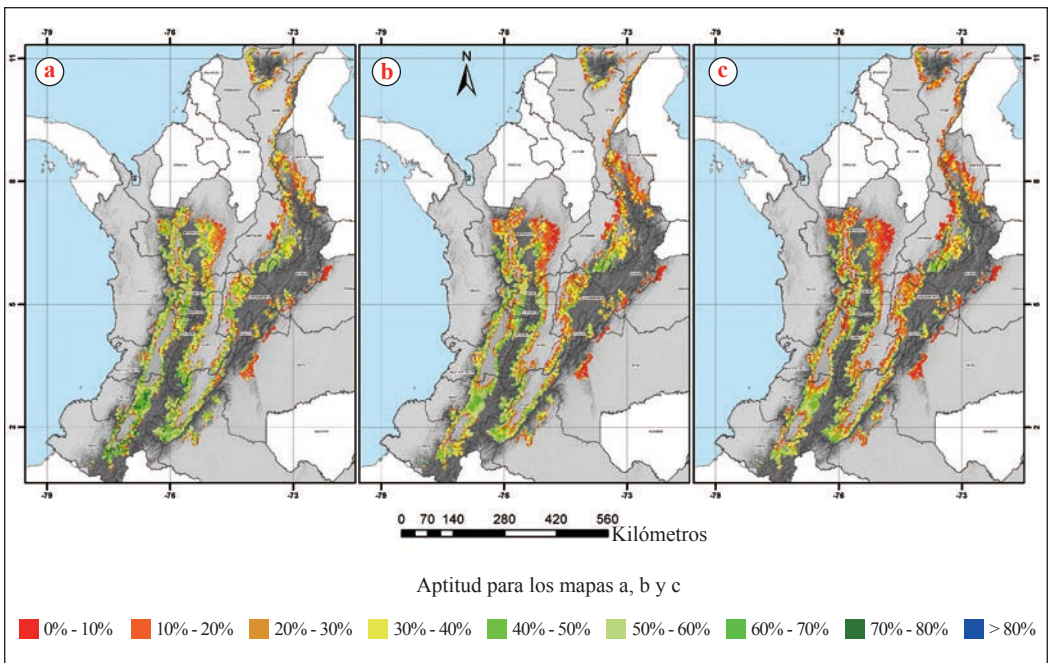


Figura 1. a. Aptitud climática actual; b. Futura 2030s y c. 2050s. Escenario A2, de las áreas productoras de café en Colombia.

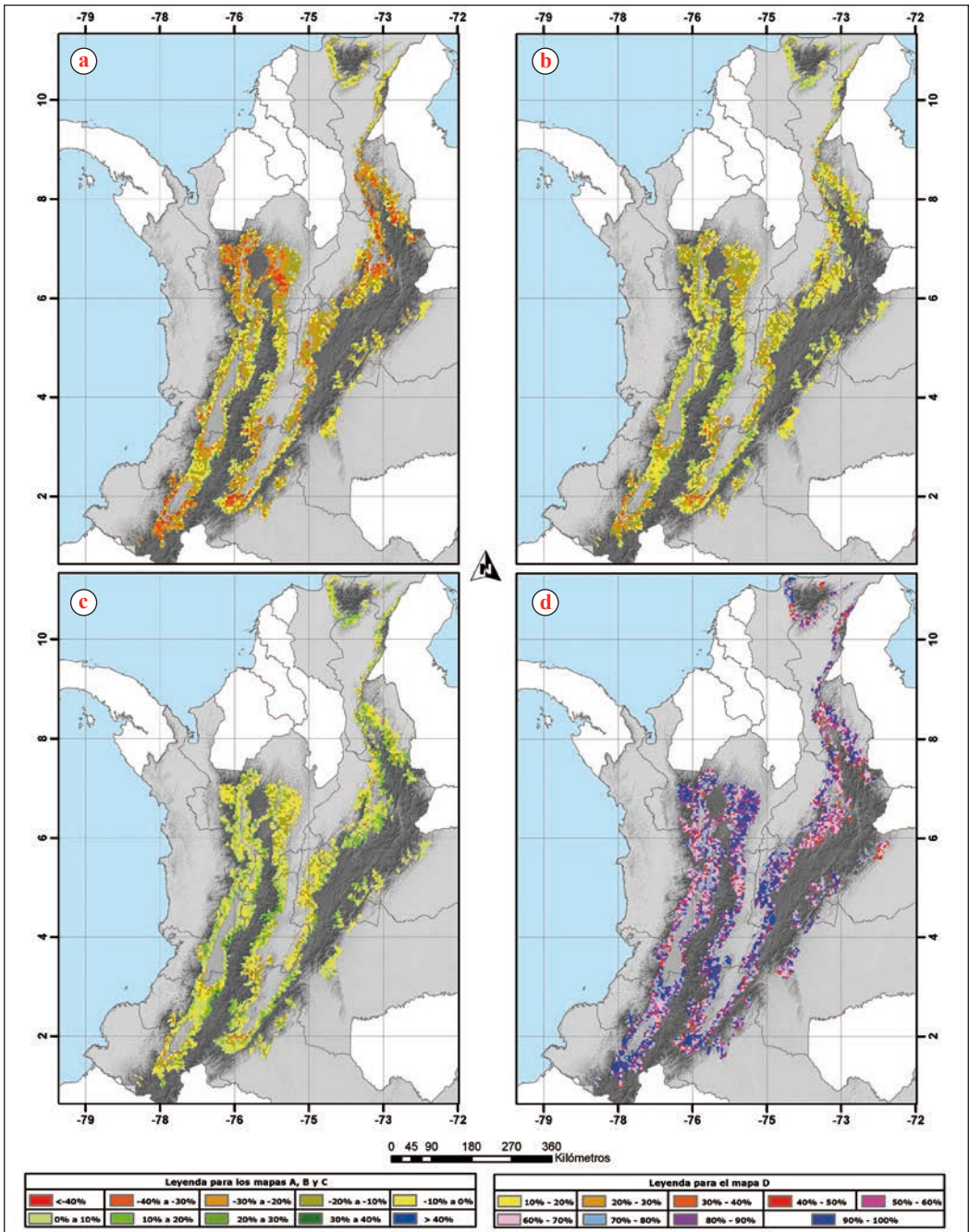


Figura 2. Incertidumbres en predicción de cambio de aptitud de las regiones cafeteras colombianas para el escenario A2 2030. Los tonos rojo y naranja representan pérdida de aptitud y verde y azul ganancia. **a.** Promedio del primer cuartil; **b.** Promedio; **c.** Promedio del tercer cuartil; **d.** Nivel de concordancia entre GCMs (fracción de los GCMs que tienen la misma tendencia de cambio de aptitud de la media).

aptitud o por lo menos no cambiarán, son Casanare, La Guajira, Magdalena y Cesar. En la Tabla 3 y los mapas de la Figura 1, se observan las áreas cafeteras que involucran los cambios por departamento (promedio de los modelos) acompañadas del grado de concordancia en el escenario A2 2030.

Un análisis de los cambios negativos superiores al 10% para A2 2030, muestra que los ecotopos 318A, 319A y 213B en el Huila, 211B y 209B en Tolima, 220A y 221A en Nariño, 102B, 105B y 101B en Antioquia, 305A en Santander, 218A y 219A en Cauca, 314A y 312A en Cundinamarca y 206A en Caldas, representan el 50% de las 319.570 ha con esta tendencia en el cambio; algunos ecotopos diferentes de los anteriores, comprometen más del 60% de su área cafetera en este cambio, son ellos el 220A, 106A, 113B, 216A y 217A en Cauca, 204B, 202B, 101A, 201B y 103B en Antioquia, 313A y 309A en Cundinamarca, 113B en Nariño, 112B en el Valle del Cauca, 211B en Huila, 206A en Caldas y 317A en Tolima, que en total representan el 14% del área.

En la Figura 1 se observa cómo los mayores cambios se prevén en las zonas bajas de las cuencas de los ríos Patía, Cauca, Magdalena y Catatumbo. Sobre la cuenca del Magdalena Medio se observa una tendencia marcada a disminuir la aptitud en zonas cafeteras del Oriente antioqueño y el Occidente de los Santanderes, Cundinamarca y Boyacá.

DISCUSIÓN

Las consecuencias de cambio de aptitud del café han sido ampliamente debatidas, el hecho radica en que el concepto aquí propuesto está fundamentado en la utilización de indicadores bioclimáticos ajustados a criterios fenológicos que se aproximan más a

las condiciones de la caficultura colombiana, en gran parte establecida sobre laderas en sistemas montañosos donde operan una gran diversidad de factores moduladores (29).

El incremento en los valores térmicos en el escenario A2 2050, registrado en las diferentes zonas cafeteras, concuerda con los valores reportados por Ramírez *et al.* (50), en los cuales la tendencia de aumentar más en el Norte que en el Sur de Colombia se mantiene. Reportes de estudios en Centroamérica están muy próximos a los obtenidos en este estudio, varios autores registran aumentos en la temperatura media de 2,0 a 2,5°C para el año 2050 (17, 32, 34, 41, 53). En Centroamérica (9), estos valores pueden llegar a extremos de 4,2°C en el año 2100, en el escenario A2. Los valores de precipitación en el mismo escenario comparado para los valores térmicos, aunque presentan una coincidencia en la tendencia en la media a aumentar en la región Andina y disminuir en la región Caribe (50), presentan efectos contrastantes entre las etapas fenológicas; el análisis indica que es muy probable que la Etapa 1 experimente incrementos en la precipitación superior al 7%, con mayor grado de certidumbre en las partes altas de la zona Sur y Piedemonte Llanero, mientras que en las Etapas 2 y 3, la condición varía dependiendo de la zona cafetera, con la mayor probabilidad de disminuciones entre el 4% y 6% esperadas en la zona Caribe. Los comportamientos más erráticos de la variación, independiente de la etapa fenológica, se observan en las máximas elevaciones de las tres cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta y sobre el Piedemonte Llanero y centro de Huila.

Algunos aspectos que pueden influir en el grado de variación corresponden al hecho de la menor densidad de estaciones meteorológicas en esos sitios, en las que

Tabla 3. Áreas comprometidas en los cambios de aptitud entre el Escenario Actual y A2 2030s, en los Departamentos Cafeteros de Colombia.

Departamento	Área Cafetera (Ha)		Cambio Negativo Superior al 10%		Área Cafetera (Ha)	Cambio Positivo		Grado de Concordancia **
			Municipios*	Ecotopos*		Municipios*	Ecotopos*	
Antioquia	62.100	Andes, Salgar, Betulia, Concordia	Moniquirá, Zetaquirá, Miraflores	102B - 105B - 101B - 101A - 204B	16.500	Ciudad Bolívar, Abejorral, Sonsón, Andes	204A - 102B - 101B - 201A - 205B	76%
Boyacá	3.321	Moniquirá, Zetaquirá, Miraflores	Moniquirá, Zetaquirá, Miraflores	306B - 310A	3.250	Moniquirá, Togui, Briceño	308A - 310A	68%
Caldas	20.208	Chinchiná, Patestina, San José, Samaná	Chinchiná, Patestina, San José, Samaná	206A - 107B - 204A	25.528	Neira, Anserma, Manizales, Aranzazu, Filadelfia, Villamaría	204A - 205A - 107B	71%
Caqueta	1.043	Puerto Rico, Montañita	Puerto Rico, Montañita	309B	812	San Vicente del Caguán	309B	77%
Casanare	-				1.354	Támara	305B	56%
Cauca	33.124	Morales, Piendamó, Caldono, Balboa, Suárez, Santander de Quilichao	Morales, Piendamó, Caldono, Balboa, Suárez, Santander de Quilichao	218A - 219A - 217A - 113B - 112B	15.540	Inzá, Páez, Caldono, Cajibío	213B - 218A - 217A - 112B	75%
Cesar	2.890	Aguachica, La Paz, Agustín Codazzi	Aguachica, La Paz, Agustín Codazzi	301A	12.944	Pueblo Bello, Valledupar, La Paz	402 - 301A	71%
Chocó	-				69	El Carmen	102A	84%
Cundinamarca	23.637	Viotá, San Juan de Río Seco, La Mesa, El Colegio, Vergara	Viotá, San Juan de Río Seco, La Mesa, El Colegio, Vergara	314A - 312A - 313A	5.467	San Cayetano, Viotá, Fusagasugá, San Francisco	310A - 315A	83%
Huila	49.689	Pitalito, Acevedo, La Plata, Pital, Saladoblanco, Tirmaná	Pitalito, Acevedo, La Plata, Pital, Saladoblanco, Tirmaná	319A - 213B - 318A - 211B	27.723	Gigante, Algeciras, Pitalito, Guadalupe, San Agustín	317A - 318A - 319A - 213B	74%

Continúa...

...continuación.

Departamento	Área Cafetera (Ha)		Cambio Negativo Superior al 10%		Área Cafetera (Ha)	Cambio Positivo		Grado de Concordancia **
			Municipios*	Ecotopos*		Municipios*	Ecotopos*	
La Guajira	565	Urumita, San Juan del Cesar	301A	301A	2.254	Urumita, Riohacha	301A - 402	68%
Magdalena	3.937	Ciénaga, Santa Marta	401	401	11.200	Ciénaga, Fundación, Santa Marta	401	77%
Meta	287	Mesetas, Lejanias	308B	308B	354	Mesetas, Lejanias	308B	75%
Nariño	28.517	La Unión, San Lorenzo, Buesaco, Colón, Sandoná	221A, 220A	220A	1.933	San Pedro de Cartago, San Pablo	220A	86%
Norte de Santander	13.368	Salazar, Cucutilla, Sardinata	302B - 301B	302B	9.399	Arboledas, Convención, Toledo, Lourdes	302B	73%
Quindío	6.365	Quimbaya, Armenia, Montenegro	210A - 211A	210A - 211A	11.366	Génova, Calarcá, Pijao	210A - 211A	71%
Risaralda	4.557	Santuario, Belén de Umbria, Apía	107B - 108B	107B - 108B	15.734	Santa Rosa, Santuario	107B - 207A - 206A	65%
Santander	17.267	Socorro, San Gil, San Vicente de Chucurí	305A - 302A - 306A	305A - 302A - 306A	8.290	Coromoro, San Andrés, Caharalá, Floridablanca	307A - 302A	67%
Tolima	32.156	Ataco, Planadas, Rioblanco, Rovira, Chaparral	211B - 209B - 316A - 210B	211B - 209B - 316A - 210B	39.576	Ibagué, Líbano, Ortega, Rovira, Anzoátegui	209B - 206B - 208B - 210B	77%
Valle del Cauca	16.546	Trujillo, Dagua, Caicedonia, Jamundí	103A - 105A - 110B	103A - 105A - 110B	27.444	Ansermanuevo, Trujillo, Tuluá, El Águila, Riofrío	103A - 108B - 214A - 110B	73%

*Corresponden a los de mayor área representada en el cambio

**Corresponde al porcentaje de modelos que presentan la misma tendencia en el cambio de aptitud (positiva o negativa) con respecto a la media

un proceso de interpolación de datos no permite un buen ajuste de los GCMs; además, procesos convectivos, de nubosidad, la circulación local y la altitud, entre otros, son factores determinantes en la precipitación (27), y los niveles de condensación, de acuerdo con la vertiente, determinan que un rango altitudinal exprese una mayor cantidad de lluvia que otra (31). El cambio en precipitación anual muestra la tendencia en zona Caribe y Santanderes a disminuir entre el 1,6% y 3,5% (30 a 64 mm anuales), esta situación registra la misma tendencia con las observaciones en Centroamérica, donde se esperan cambios negativos entre 80 y 85 mm en Sierra Madre (México) (41, 53), entre 5% y 10% en Honduras y Nicaragua (32), 70 mm en Nicaragua y 80 mm en Veracruz (México) (33). De acuerdo con un informe de la CEPAL (9), respecto al promedio del período 1980-2000 en el escenario A2, Centroamérica tendrá una reducción de la precipitación en promedio del 28% hacia el año 2100, con los valores de reducción más bajos en Panamá (18%) y más altos en Nicaragua (35%).

La aptitud del cultivo presenta una tendencia progresiva de cambios negativos superiores al 10%, que comprometen el 20% y 34% del área cafetera nacional en los años 2030 y 2050, respectivamente. La situación más crítica se presentará en aquellos sitios con menor aptitud hoy, menor al 50%, que registrarán tendencia en cambio negativo superior a 10%: Palestina, Samaná, San José, Risaralda y Chinchiná en Caldas; Cañasgordas, Ituango, Betulia, Dabeiba, Yolombó, Liborina, Santafé de Antioquia, Santa Bárbara, San Roque, Fredonia, Betania, Amalfi, Peque y Salgar en Antioquia; Santa Marta y Ciénaga en Magdalena; San Juan de Riosoco, Viotá, Pulí y Peque en Cundinamarca; San Gil en Santander; Chaparral, Líbano, Rovira, Dolores, Cunday y Ortega en Tolima; Tarquí

en Huila; Quimbaya, Montenegro y Armenia en Quindío, Belén de Umbría en Risaralda; Toledo y Sardinata en Norte de Santander; Sevilla y Jamundí en Valle del Cauca; Suárez en Cauca.

Los municipios anteriores representan el 40% del área que registrará este cambio negativo, que corresponde a 133 mil hectáreas, de las cuales el 55% se encuentra bajo sombra; en esta condición la temperatura media y la amplitud térmica tienden a disminuir ya que los árboles de sombra actúan como amortiguadores, la reducción en temperatura media es cercana a 5°C (5) y la temperatura mínima de las hojas del café se incrementa entre 2 y 4°C (7), adicionalmente, bajo sistemas de alta sombra, una reducida variabilidad microclimática se traduce en reducción de la fluctuación térmica y la radiación solar, que a su vez disminuye la evapotranspiración (39).

Las zonas cafeteras que registran actualmente aptitud mayor al 50% según el modelo de Maxent, 483 mil hectáreas, se enmarcan dentro de caficultura al sol de manera preferente (60%), en 187 mil hectáreas se registrarán cambios negativos, superiores al 10% en el año 2030, que comprometerán principalmente los siguientes municipios cafeteros: Pitalito, Acevedo, La Plata, Timaná, Saladoblanco, Pital, Santa María, Oporapa, Neiva, San Agustín, Garzón, Palermo y Gigante en el Huila; Ataco, Planadas, Rioblanco y Alpujarra en Tolima; Concordia, Andes Salgar, Pueblorrico y Ciudad Bolívar en Antioquia; La Unión, San Lorenzo, Colón, Sandoná, Buesaco, Samaniego, La Florida, Consacá y El Tablón en Nariño; Morales, Piendamó, Caldon, Balboa, Santander de Quilichao, La Vega, Toribío, El Tambo, Bolívar, Sucre y Argelia en Cauca; Chinchiná, Pácora y Belalcázar en Caldas; Argelia, Trujillo, Caicedonia, Dagua y El Cairo en Valle del

Cauca; Viotá y Vergara en Cundinamarca; Rionegro y San Vicente de Chucurí en Santander; Salazar y Cucutilla en Norte de Santander. El área en cambio negativo de los anteriores municipios representa el 65% del total estimado.

En el estudio más reciente realizado por Ovalle *et al.* (44), muestra cómo para el año 2050, en escenario A2, utilizando la metodología descrita, pero con indicadores bioclimáticos de *WorldClim*, los valores de cambio de aptitud para Colombia son de -0,16, -0,61 y 0,14 para la media y los límites inferior y superior, respectivamente. Aunque no se realiza el detalle por zonas, es claro que el modelo determina un rango de respuestas con pérdida de aptitud para la mayor parte de zonas y aumento para otras. Los autores predicen el movimiento de las áreas cafeteras hacia mayores altitudes, debido a la pérdida de aptitud de las zonas por debajo de 1.800 m. Vale aclarar que este estudio realizado para Colombia, incluye el conocimiento previo e información estructural de la caficultura, en la cual los dinamismos de los sistemas de producción con alternativas de adaptación como sombra y uso de variedades locales resistentes y desarrollo de estrategias sostenibles entre otras, le ha permitido a los caficultores mantener su productividad y calidad.

Puede concluirse que los resultados de la modelación de escenarios climáticos plantean que es muy probable que en la zona cafetera colombiana la condición de temperatura media aumente hacia el futuro, con cambios entre 1,2 y 2,5°C para los años 2030 y 2050, respectivamente. La lluvia disminuye en la zona Caribe, Piedemonte Llanero y zona Centro Norte, mientras que en la zona Sur tiende a aumentar o permanecer igual. El TT presenta aumentos entre 120 y 230 grados/día para los años 2030 y 2050, respectivamente.

Los cambios a futuro muestran mejor explicación cuando se analizan por etapas de desarrollo del cultivo. En el entorno de toda la caficultura se destaca que la Etapa 1, relacionada con la floración, experimentará aumento de la lluvia, mientras en las siguientes etapas de desarrollo del fruto, disminuirá en unas zonas y aumentará en otras. Independiente de la etapa, las zonas cafeteras que con mayor grado de probabilidad incrementarán la lluvia hacia futuro serán aquellas ubicadas en la zona Sur de Colombia, con patrón de cosecha principal de primer semestre y la zona Oriental de Antioquia y Caldas y Noroccidental de Cundinamarca, contrario lo manifestarán las zonas cafeteras del Norte de Colombia, entre la región Centro-Occidente de Santander y La Guajira; en estas últimas zonas, el TT se muestra con incrementos de más de 125 grados/día por etapa en el escenario A2 2030, situación contrastante con el resto de las zonas cafeteras que tendrán incrementos de TT entre 105 y 125 grados/día, con los valores más bajos en zonas cafeteras del Sur de Colombia, descritas anteriormente por incrementar la lluvia.

El modelo Maxent permite explorar la tendencia futura ligada a los cambios en los elementos climáticos. Se identifica de manera consistente, cómo la aptitud disminuirá en gran parte de la zona cafetera colombiana, con mayor énfasis en aquellas áreas ubicadas hacia las zonas medias y bajas sobre las grandes cuencas hidrográficas, donde predomina hoy la caficultura a la sombra. El modelo además, muestra una tendencia de proyectar una gran pérdida de aptitud en zonas cafeteras del Sur del país en los departamentos de Huila, Cauca y Nariño, sobre las cuales los elementos climáticos asociados a los modelos en diferentes años (2030 y 2050) del escenario A2, presentan una tendencia a disminuir las condiciones de nubosidad, por efecto de mayor radiación y

temperatura, y una tendencia a aumentar la precipitación, situación contrastante con la tendencia en la disminución de aptitud, que determinaría un ajuste metodológico en los supuestos a priori del modelo.

El análisis efectuado con información de *WorldClim* permitió explorar la tendencia de los GCMs con base en indicadores bioclimáticos ajustados a los períodos fenológicas del cultivo. En esta primera etapa se trabajó con una resolución de 5,0 km y bioindicadores consolidados a nivel mensual. En próximas modelaciones se recomienda realizar un ajuste en la resolución a 2,5 km ó 1,0 km y consolidación a nivel decadal o diario, principalmente en la obtención del IHS.

El hecho que los indicadores de Tiempo Térmico tengan mayor mérito en su contribución en los modelos de aptitud, supone un ajuste en condiciones de cultivo, ya que hemos presumido varios supuestos: 1. El coeficiente del cultivo (Kc) se tomó con valor de 1, cultivos en estados de desarrollo vegetativo tendrán valores menores, entre 0,2 y 0,89 (38); 2. La temperatura base inferior, que corresponde a la temperatura por debajo de la cual el crecimiento es nulo, se determinó en 10°C (28), no obstante, ésta puede variar de acuerdo con el período fenológico. En período vegetativo para las variedades Acaia Cerrado y Rubi, desde trasplante hasta primera floración, Lima y DaSilva (38), la estimaron en 12,9°C; 3. Factores asociados a extremos térmicos o pueden causar regulación estomática (temperaturas altas) o incrementar la respiración (temperaturas muy bajas o muy altas), que disminuyen la fotosíntesis neta, situaciones que disminuirán el potencial de grados/día.

Sobre la hipótesis que la sombra suministra un ambiente más regulado, y que la información de las estaciones climáticas se obtiene

en sitios despejados, es posible que los valores de aptitud en muchas regiones mejoren, presumiendo que otros aspectos relacionados con las condiciones de suelo y manejo, entre otros, no son limitantes. Para este último aspecto será importante abordar investigaciones que incluyan la adaptación de genotipos, arreglos espaciales de la sombra y del cultivo, dinámica de los nutrientes y del agua, entre otros, que garanticen una sostenibilidad y permitan afrontar los retos que impone la variabilidad climática.

A partir de la generación de información agroclimática, adicionalmente a la que tiene cada predio cafetero, relacionada con su estructura de producción, es posible construir un marco de referencia para la planificación actual y futura, que garantice un ajuste escalonado del sistema productivo. Es importante abordar las metodologías dando mayor énfasis al concepto experto, que permita construir un marco metodológico y soportar las decisiones con mejor criterio.

AGRADECIMIENTOS

A la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, en especial al doctor Fernando Gast, exdirector de Cenicafé. Al grupo de profesionales del Proyecto DAPA del CIAT a cargo del doctor Andrew Jarvis. Al especialista en sistemas de información geográfica Audberto Quiroga, que participó en el desarrollo metodológico de construcción de los indicadores bioclimáticos, elaboración de los procesos batch para modelación con Maxent y construcción de mapas temáticos.

LITERATURA CITADA

1. ARCILA, J.; BUHR, L.; BLEIHOLDER, H.; HACK, H.; WICKE, H. Application of the "extended BBCH - scale" for the description of the growth stages of

- coffee (*Coffea* sp.). Chinchiná : Cenicafé, 2001. 32 p. (Boletín Técnico No. 23).
2. ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; BALDIÓN, J.V.; BUSTILLO P., A.E. La floración del café y su relación con el control de la broca. Chinchiná : Cenicafé, 1993. 6 p. (Avances Técnicos No. 193).
 3. ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del café. Chinchiná : Cenicafé, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 311).
 4. BAKER, P.; HAGGAR, J. Global warming: The impact on global coffee. Long Beach : SCAA, 2007. 14 p.
 5. BEER, J.; MUSCHLER, R.; KASS, D.; SOMARRIBA, E. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry systems* 38(1):139-164. 1998.
 6. CAMAYO, G.; CHAVES, B.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Desarrollo floral del café y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 54(1):35-49. 2003.
 7. CARAMORI P., A. FILHO; MORAIS, H. FILHO; DUQUIA, C. Sistema de aleta pars geadas na cafeicultura do Paraná. *Informe agropecuario* 28(241):66-71. 2007.
 8. CASTELLANOS, E.; TUCKER, C.; EAKIN, H.; MORALES, H.; BARRERA, J.; DÍAZ, R. Assessing the adaptation strategies of farmers facing multiple stressors: Lessons from the coffee and global changes project in Mesoamerica. *Environmental science and policy* 26:19-28. 2013.
 9. CEPAL; CAC; SICA. Impactos potenciales del cambio climático sobre el café en Centroamérica [En línea]. México : CEPAL, 2014. 129 p. Disponible en internet: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37456-impactos-potenciales-cambio-climatico-cafe-centroamerica>. Consultado el 16 de abril de 2018.
 10. EAKIN, H.; TUCKER, C.; CASTELLANOS, E. Responding to the coffee crisis: A pilot study of farmers' adaptations in Mexico, Guatemala and Honduras. *The geographical journal* 172(2):156-71. 2006.
 11. ELITH, J.; GRAHAM, C.H. Do they? How do they? Why do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography* 32(1):66-77. 2009.
 12. FNC. Documento estratégico sostenibilidad de la caficultura colombiana: Diagnóstico climático, alternativas de adaptación para la caficultura. Bogotá : FNC, 2011. 36 p.
 13. FNC. Sistema de información cafetera SICA. [En línea]. Bogotá : FNC, 2013. Disponible en internet: http://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/servicios_para_el_cafetero/sistema_de_informacion_sica/. Consultado el 30 de agosto de 2013.
 14. FNC. Fenómeno de El Niño afecta caficultura colombiana: Al grano. [En línea]. Bogotá : FNC, 2015. 31 p. Disponible en internet: http://www.federaciondecafeteros.org/algrano-fnc-es/index.php/comments/fenomeno_de_el_nino_afecta_caficultura_colombiana.
 15. GARCÍA L., J.C. Dominios de recomendación y representatividad de las estaciones experimentales de Cenicafé. Manizales : Universidad de Caldas, 2013. Tesis: Doctorado.
 16. GÓMEZ G., L.; CABALLERO R. A.; BALDIÓN R., J.V. Ecotopos cafeteros de Colombia. Bogotá : CENICAFE : FNC, 1991. 138 p.
 17. HAGGAR, J.; SCHEPP, K. Coffee and climate change desk study: Impacts of climate change in four pilot countries of the coffee and climate initiative. Hamburg : Coffee and climate, 2011. 78 p.
 18. HIJMANS, R.; CAMERON, S.; PARRA, J.; JONES, P.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology* 25(15):1965-1978. 2005.
 19. IDEAM; PNUD; MADS; CANCELLERIA. Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura para Colombia 2011-2100. [En línea]. Bogotá : IDEAM, 2015. 278 p. Disponible en internet: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/cambio-climatico/comunicacion-nacional-bur-2015?inheritRedirect=true>. Consultado el 16 de abril de 2018.
 20. IDEAM; PNUD; MADS; GEF. Segunda comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. [En línea]. Bogotá : IDEAM, 2010. 73 p. Disponible en internet: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/cambio-climatico/comunicacion-nacional-bur-2015?inheritRedirect=true>. Consultado el 16 de abril de 2018.
 21. IDEAM. Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática “El Niño” y “La Niña. [En línea]. Bogotá : IDEAM, 2016.

- Disponible en internet: www.pronosticosyalertas.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/pronosticos-alertas/fenomenos-el-nino-y-la-nina. Consultado el 16 de abril de 2018.
22. IPCC. Escenarios de emisiones resumen para responsables de políticas: Informe especial del grupo de trabajo III del IPCC. Ginebra : IPCC, 2000. 27 p.
 23. IPCC. Cambio climático 2007 informe de síntesis: Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Ginebra : IPCC, 2007. 104 p.
 24. IPCC. Cambio climático 2014 impactos, adaptación y vulnerabilidad: Resumen para responsables de políticas. [En línea]. Suiza : IPCC, 2014. p. 34. Disponible en internet: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/index_es.shtml.
 25. JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J. Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de El Niño y su efecto en la caficultura. Chinchiná : Cenicafé, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 390).
 26. JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J. Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de La Niña y su efecto en la caficultura. Chinchiná : Cenicafé, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 389).
 27. JARAMILLO R., A.; CHAVES, B. Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. Cenicafé 51(2):102-13. 2000.
 28. JARAMILLO R., A.; GUZMÁN, O. Relación entre la temperatura y el crecimiento en *Coffea arabica* L., variedad caturra. Cenicafé 35(3):57-65. 1984.
 29. JARAMILLO R., A. Climatología de la región andina de Colombia: Microclima y fenología del cultivo del café. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 156 p.
 30. JARAMILLO R., A. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 262).
 31. JARAMILLO R., A. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná : FNC : Cenicafé, 2005. 195 p.
 32. LÄDERACH, P.; HAGGAR, J.; LAU, C.; EITZINGER, A.; OVALLE, O.; BACA, M.; Café mesoamericano: Desarrollo de una estrategia de adaptación al cambio climático: CIAT políticas en síntesis. Palmira : CIAT, 2011. 4 p.
 33. LÄDERACH, P.; KATHLEEN, S.; RAMÍREZ, J.; JARVIS, A.; EITZINGER, A. Impacto del cambio climático para el cultivo de café en Nicaragua. En: MARTÍNEZ, C. Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina. Turialba : CATIE, 2010. 14 p.
 34. LÄDERACH, P.; LUNDY, M.; JARVIS, A., J.R.; PÉREZ, P.; SCHEPP, K. Predicted impact of climate change on coffee-supply chains. En: LEAL, F.W. The economic, social and political elements of climate change. Verlag : Springer, 2010. 19 p.
 35. LÄDERACH, P.; MARTÍNEZ, A.; SCHROTH, G.; CASTRO, N. Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries, Ghana and Côte d'Ivoire. Climatic change 119(3/4):841-854. 2013.
 36. LÄDERACH, P.; ZELAYA, C.; OVALLE, O.; GARCÍA, S.; EITZINGER, A.; BACA, M. Escenarios del impacto del clima futuro en áreas de cultivo de café en Nicaragua. Cali : CIAT, 2012. 32 p.
 37. Cafeteros recibirán más recursos para mitigar efectos de la sequía. [En línea]. En: La opinión. Cúcuta, Abril 25, 2016. Disponible en internet: <https://www.laopinion.com.co/economia/cafeteros-recibiran-mas-recursos-para-mitigar-efectos-de-la-sequia-110744#ATHS>. Consultado el 16 de abril de 2018.
 38. LIMA, E.; SILVA, E. DA. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-día para cafeeiro arábica em fase de implantacao. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental 2(3):266-73. 2007.
 39. LIN, B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. Agricultural and forest meteorology 144(1/2):85-94. 2007.
 40. MONTOYAR, E.C., ARCILAP, J., JARAMILLO R., A., RIAÑO H., N.M., QUIROGA Z., F.A. Modelo para simular la producción potencial del café en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2009. 52 p. (Boletín Técnico No. 33).
 41. MORALES, M.; VIRGINNIO, E.; LEÓN, C.; TINOCO, J.; HILLS, T.; VÁZQUEZ A. Estrategia del sector cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en la sierra madre de Chiapas. México : CATIE : FUNCAFOR : UACH : CI VA : CONANP : COMCAFE : PNUD : FIECH : SEMAHN. 2011. 79 p.
 42. MUÑOZ, L. La inestabilidad climática. [En línea]. Bogotá : FNC, 2013. Disponible en internet:

- http://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Editorial_la_inestabilidad_climatica.pdf. Consultado el 23 de julio de 2013.
43. OIC. Statistics on coffee. [En línea]. Bogotá : FNC, 2013. Disponible en internet: http://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Editorial_la_inestabilidad_climatica.pdf. Consultado el 23 de julio de 2013.
 44. OVALLE, O.; LADERACH, P.; BUNN, C.; OBERSTEINER, M.; SCHROTH, G. Projected shifts in coffee arabica suitability among major global producing regions due to climate change. *Plos One* 10(4):1-13.
 45. PHILLIPS, P.; ANDERSON, R.; SCHAPIRE, R. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling* 190(3/4):231-259. 2006.
 46. PHILLIPS, P.; DUDÍK, M.; SCHAPIRE, R. A maximum entropy approach to species distribution modeling. Alberta : International conference on machine learning, 2004. 8 p.
 47. RAMALHO, M.; SILVA, G.; SANTOS, L. Genetic plant improvement and climate changes. *Crop breeding and applied biotechnology* 9(2):189-195. 2009.
 48. RAMÍREZ, J.; JARVIS, A.; LADERACH, P. Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and forest meteorology* 170:67-78. 2013.
 49. RAMÍREZ, J.; JARVIS, A. Downscaling global circulation model outputs: The delta method decision and policy analysis working paper. Cali : CIAT, 2010. 17 p.
 50. RAMÍREZ, J.; SALAZAR, M.; JARVIS, A.; NAVARRO, C. A way forward on adaptation to climate change in colombian agriculture: Perspectives towards 2050. *Climatic change* 115(3/4):611-628. 2012.
 51. RAMÍREZ, V.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A.; RENDÓN, J.; CUESTA, G.; MENZA, H. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé* 61(2):132-58. 2010.
 52. RAMÍREZ, V.; JARAMILLO, A. Relación entre el índice oceánico del Niño y la lluvia, en la región andina central de Colombia. *Cenicafé* 60(2):161-72. 2009.
 53. SCHROTH, G.; LADERACH, P.; DEMPEWOLF, J.; PHILPOTT, S.; HAGGAR, J.; EAKIN, H. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the sierra madre de Chiapas. Mexico : Mitigation and adaptation strategies for global change 14(7):605-625. 2009.
 54. TEAM RDC R.: A language and environment for statistical computing. Vienna : R foundation for statistical computing, 2008.
 55. VAN OIJEN, M.; DAUZAT, J.; HARMAND, J.; LAWSON, G.; VAAST, P. Coffee agroforestry systems in central America: A review of quantitative information on physiological and ecological processes. *Agroforest systems* 80(3):341-359. 2010.
 56. VAN OIJEN, M.; DAUZAT, J.; HARMAND, J.; LAWSON, G.; VAAST, P. Coffee agroforestry systems in central America: Development of a simple process-based model and preliminary results. *Agroforest systems* 80(3):361-78. 2010.