

Tendencia anual de los grados día cafeto y los grados día broca en la región andina ecuatorial de Colombia

Annual trends of the Coffee Degree Day and Coffee Borer Degree Day in the equatorial Andean region in Colombia

Carolina Ramírez C.,¹ Jhoana Daza G.,² Andrés J. Peña Q.³

¹ Especialista Ingeniería hidráulica y ambiental, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Asistente de Investigación, Programa de Caficultura y Variabilidad Climática, Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). Manizales, Colombia carolina.ramirez@cafede colombia.com

² Estudiante de Ingeniería Agronómica, Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal (Unisarc). Santa Rosa de Cabal, Colombia. jjhoanad@gmail.com

³ MSc, Universidad Nacional de Colombia. Estudiante AgWeatherNet Program, Washington State University. Prosser, EE. UU. andres.penaquinones@wsu.edu.

Fecha de recepción: 15/12/2014

Fecha de aceptación: 02/02/2015

Para citar este artículo: Ramírez C, Daza J, Peña AJ. Tendencia anual de los grados día cafeto y los grados día broca en la región andina ecuatorial de Colombia. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecu.* 16(1): 51-63

Abstract

It is expected that climate change modifies the current spatial pattern of coffee cultivation in mountainous slopes of Colombia. However, the approaches used to reach these results are based on the use of (global and regional) climate models and species distribution models that largely supported in the niche concept. In order to assess the certainty of the results obtained with these models, a methodology in which data from weather stations and an index of agroclimatic type (thermal time), expressed as degree days are used. The best approximation for thermal time calculation was determined. Then, a multiyear monthly accumulated of coffee degree-days and coffee berry borer degree-days were generated (using the simple triangle method) by using daily data from weather stations with more than 20 years of information. The nonparametric trend analysis (Mann-Kendall) and correlation analysis were used to determine effects of climate variability associated with the occurrence of El Niño and La Niña, on the thermal time of the two mentioned species. Significant, positive trends, in coffee degree-days and coffee berry borer degree-days were found at heights (above sea level) where the optimum coffee growth is reported.

Key words: Climate change, ENSO, air temperature, thermal time, borer, coffee.

Resumen

Se prevé que el cambio del clima modifique el actual patrón espacial del cultivo del café en las laderas montañosas de Colombia. No obstante, las aproximaciones utilizadas para llegar a estos resultados se basan en el uso de modelos climáticos (globales y regionales) así como modelos de distribución de especies que, en gran medida, se soportan en el concepto de nicho. Con el fin de evaluar la certidumbre de los resultados obtenidos con dichos modelos, se plantea una metodología en la que se utilizan datos de estaciones meteorológicas y un índice de tipo agroclimático (tiempo térmico) cuya unidad son los grados día. Se determinó la mejor aproximación para el cálculo del tiempo térmico y se generaron los acumulados mensuales multianuales de grados día cafeto y grados día broca (utilizando el método del triángulo sencillo) usando los datos diarios de temperaturas extremas de estaciones meteorológicas con información histórica superior a 20 años. Se empleó el análisis de tendencias no paramétrico (prueba de Mann-Kendall) y el análisis de correlación para determinar efectos de la variabilidad climática, asociada a la ocurrencia de los fenómenos de El Niño y La Niña, sobre el tiempo térmico de las dos especies mencionadas. Se encontraron tendencias positivas significativas de los grados día broca y los grados día cafeto en las alturas sobre el nivel del mar óptimas, reportadas por diferentes autores para estas especies; es decir, los óptimos actuales se hacen cada vez más aptos para las dos especies analizadas.

Palabras claves: Cambio climático, ENOS, temperatura del aire, tiempo térmico, broca, cafeto

Introducción

La preocupación por conocer el efecto que tendrá el cambio del clima sobre la producción agrícola mundial y nacional ha llevado a que diferentes autores intenten determinar escenarios productivos futuros y, sobre todo, traten de definir estrategias de adaptación de los cultivos frente a la amenaza que representa la oferta climática cambiante (Ramírez-Villegas et al. 2012). En Colombia, donde el cultivo del café representa la principal actividad económica agrícola, las variaciones de la oferta climática determinan cambios importantes en la economía del país (Federación... 2012) y, por lo tanto, se han hecho esfuerzos para determinar los impactos del cambio del clima sobre esta actividad.

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología convencional de medición de impacto del cambio del clima sobre el cultivo del café, que incluye el uso de modelos climáticos globales en escenarios de cambio climático (Fischer et al. 2002) y análisis basados en el enfoque de nicho ecológico, muestran que, de acuerdo a los umbrales térmicos reportados en EcoCrop (FAO 2002), el café tiende a encontrar sus óptimos fisiológicos y productivos a mayor altura sobre el nivel del mar, por efecto del incremento generalizado de la temperatura del aire (Laderach et al. 2011).

Este trabajo pretende determinar si existe una tendencia en las series mensuales multianuales del tiempo térmico de dos especies asociadas a los sistemas de producción

de café en la zona andina ecuatorial colombiana, que permitan validar el efecto proyectado de ascenso (en la cordillera) de la franja óptima para el cultivo. En este caso, el tiempo térmico, que tradicionalmente se ha utilizado para cuantificar y predecir eventos fenológicos, se utilizó para cuantificar los cambios de la oferta ambiental para broca y café. La ventaja de utilizar este índice radica en que en su construcción se tiene en cuenta que en organismos ectotermos y en plantas la tasa de muchos procesos de desarrollo y crecimiento están determinados por la temperatura del aire (Taylor 1981; Jones 1992). En este caso, el índice, expresado en grados día (GD), determina el tiempo medio en que el organismo tuvo condiciones óptimas para su desarrollo. En términos sencillos, el incremento de los GD, calculados con base en las temperaturas umbral máxima y umbral mínima, pueden ser entendidos como un incremento de las condiciones óptimas para el crecimiento y el desarrollo de un organismo.

Materiales y métodos

Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y temperatura mínima del aire, procedentes de estaciones climáticas que cuentan con más de 20 años de información (tabla 1), que hacen parte de la red meteorológica convencional de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC); así como datos de estas mismas variables, medidos con mayor frecuencia (cada cinco minutos), provenientes de las estaciones que hacen parte de la red meteorológica automatizada de la misma entidad.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas

N.º	Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud	Long serie
1	Ospina Pérez	Consacá	Nariño	1° 15'N	77° 29'W	1.603	1953-2010
2	Jorge Villamil	Gigante	Huila	2° 20'N	75° 31'W	1.420	1955-2010
3	Manuel Mejía	El Tambo	Cauca	2° 24'N	76° 44'W	1.735	1953-2010
4	Julio Fernández	Restrepo	Valle	3° 49'N	76° 32'W	1.381	1954-2010
5	Manuel M. Mallarino	Trujillo	Valle	4° 13'N	76° 19'W	1.331	1969-2010
6	Heraclio Uribe	Sevilla	Valle	4° 17'N	75° 55'W	1.540	1954-1991

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

N.º	Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud	Long serie
7	Granja Tibacuy	Tibacuy	Cundinamarca	4° 22' N	74° 26' W	1.538	1952-2010
8	<u>Paraguaicito</u>	Buenavista	Quindío	4° 24' N	75° 44' W	1.203	1963-2010
9	La Bella	Calarcá	Quindío	4° 30' N	75° 40' W	1.449	1976-2010
10	<u>El Agrado</u>	Montenegro	Quindío	4° 31' N	75° 48' W	1.275	1987-2010
11	Misiones	Mesitas del Colegio	Cundinamarca	4° 33' N	74° 26' W	1.540	1978-2010
12	Maracay	Quimbaya	Quindío	4° 36' N	75° 44' W	1.402	1982-2010
13	Arturo Gómez	Alcalá	Valle	4° 40' N	75° 47' W	1.259	1967-2010
14	El Cedral	Pereira	Risaralda	4° 42' N	75° 32' W	2.120	1968-2010
15	La Catalina	Pereira	Risaralda	4° 45' N	75° 44' W	1.321	1987-2010
16	Albán	El Cairo	Valle	4° 47' N	76° 11' W	1.510	1975-2010
17	La Trinidad	Líbano	Tolima	4° 54' N	75° 02' W	1.456	1976-2010
18	El Jazmín	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	4° 55' N	75° 37' W	1.635	1975-2010
19	<u>Naranjal</u>	Chinchiná	Caldas	4° 58' N	75° 39' W	1.381	1956-2010
20	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	5° 00' N	75° 36' W	1.310	1950-2010
21	Llanadas	Manzanares	Caldas	5° 12' N	75° 08' W	1.420	1956-1979
22	Santa Helena	Marquetalia	Caldas	5° 19' N	75° 00' W	1.395	1981-2010
23	Montelíbano	Yacopí	Cundinamarca	5° 27' N	74° 20' W	1.365	1971-2010
24	Rafael Escobar	Supía	Caldas	5° 27' N	75° 38' W	1.307	1982-2004
25	Agronomía	Manizales	Caldas	5° 03' N	75° 30' W	2.088	1956-2010
26	Miguel Valencia	Jardín	Antioquia	5° 36' N	75° 51' W	1.621	1956-2010
27	Granja Luker	Palestina	Caldas	5° 04' N	75° 41' W	1.031	1972-2010
28	Santagueda	Palestina	Caldas	5° 04' N	75° 40' W	1.026	1965-2010
29	El Rosario	Venecia	Antioquia	5° 58' N	75° 42' W	1.635	1967-2010

Determinación del método para el cálculo de tiempo térmico

Para el cálculo del tiempo térmico se partió de la premisa de que el método del corte vertical, citado por Roltsch et al. (1999), es la mejor alternativa para determinar la cantidad de temperatura disponible para el desarrollo de un organismo en cualquier localidad. Conceptualmente, al utilizar esta metodología, se asume que la tasa

de crecimiento y desarrollo de cualquier ectotermo se detiene o cesa cuando la temperatura del aire está por debajo del umbral mínimo o por encima del umbral máximo definido para la especie (figura 1a), contrario a lo que sucede cuando se utiliza el corte horizontal, método en el cual el crecimiento y desarrollo continua constante a temperaturas que superan el umbral máximo, es decir, que el área por encima de ese umbral se resta de la zona por encima del umbral mínimo (figura 1b).

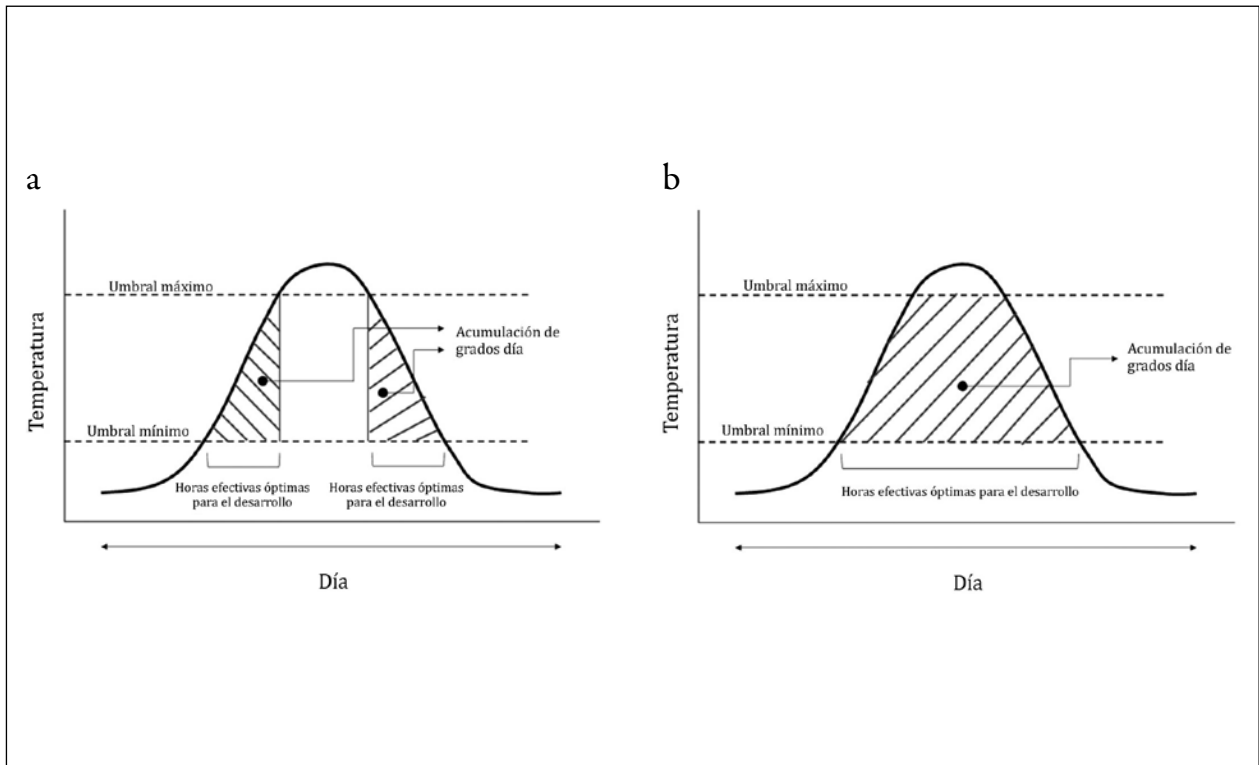


Figura 1. Diferencia conceptual existente entre los métodos del corte vertical y del corte horizontal.

Para definir el método que mejor representa el comportamiento diario de la temperatura a partir de las temperaturas extremas (mínima y máxima), se comparó el tiempo térmico calculado a partir de las temperaturas máxima y mínima diarias (utilizando cuatro aproximaciones asociadas al corte vertical y el método de la temperatura base) con el tiempo térmico calculado utilizando el método de acumulación y 288 datos de temperatura del aire por día (cada cinco minutos) (tiempo térmico real), procedentes de 30 días seleccionados al azar en tres estaciones meteorológicas automáticas (Paraguaicito, El Agrado y Naranjal, subrayadas en la tabla 1). Para decidir el método más apropiado se utilizó el análisis de regresión lineal, en el que se evaluó el

coeficiente de determinación, la probabilidad de que la pendiente y el intercepto de los modelos calculados sean uno y cero, respectivamente, y el error típico de estimación, el cual es menor en tanto mejor es el ajuste. Las cuatro aproximaciones mencionadas son el triángulo sencillo (TS) (Lindsey y Newman 1956), el triángulo doble (TD) (Sevacherian et al. 1977), el seno sencillo (SS) y el seno doble (SD) (Allen 1976), mientras que la aproximación basada en la temperatura base se abordó como se describe en Prela et al. (2006). Los umbrales mínimos y máximos utilizados para café, fueron 9,6 °C y 28 °C, respectivamente (Riaño 2010), mientras que para broca, el umbral mínimo utilizado fue 14,9 °C y el umbral máximo fue 27 °C (Jaramillo et al. 2009).

Análisis de tendencias y de variabilidad a escala anual

Después de definir el mejor método para el cálculo del tiempo térmico a partir de la información de las temperaturas extremas diarias del aire, se procedió a generar la serie de GD broca y GD café a escala diaria de las estaciones que se muestran en la tabla 1. Posteriormente, se construyeron las series de tiempo térmico acumulado de cada estación a escala mensual multianual y se analizó su tendencia a través de la prueba de Mann Kendall (Hipel y McLeod 1994), que ha demostrado ser eficiente y robusta para analizar series de tiempo no autocorrelacionadas (Hamed 2008; Peña et al. 2011). La tendencia general de cada estación se evaluó en función del número de meses con tendencia significativa (positiva o negativa).

El predominio de meses con tendencias positivas está asociado al incremento de las condiciones óptimas de temperatura ambiental para el crecimiento y desarrollo del café y de la broca, respectivamente, mientras que, por el contrario, las tendencias negativas significan la pérdida de dicha condición.

Asimismo, se analizó el efecto de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre las series históricas de GD con la metodología planteada en Ramírez y Jaramillo (2009), en la que se utiliza el coeficiente de correlación y el signo de la pendiente (positivo o negativo) para determinar

el nivel de incidencia del ENOS sobre el tiempo térmico acumulado a escala mensual. Es de anotar que la metodología planteada por estos autores se basa en el uso de los datos históricos del Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) para determinar los meses Niño y Niña. Los valores de ONI por debajo de -0,5 se consideran eventos Niña, mientras que valores superiores a 0,5 se consideran eventos Niño. Valores entre -0,5 y 0,5 se consideran neutros.

Resultados y discusión

Método para la generación del tiempo térmico

Los GD generados a partir de los datos de temperatura del aire (con intervalos de cinco minutos) (TTR) están altamente relacionados con los GD generados por cuatro de los cinco métodos evaluados, siendo TB el método que no presentó relación (tabla 2). El resultado puede ser lógico en el sentido que dicho método es el único que asume que cualquier ectotermo es capaz de aumentar indefinidamente su tasa de desarrollo y crecimiento en la medida que la temperatura media del aire (calculada como el promedio entre la temperatura máxima y la mínima) se incrementa, lo cual no es acorde con la realidad. Según los resultados presentados en la tabla 2, el método más indicado para el cálculo del tiempo térmico en las condiciones de la caficultura colombiana es el TS.

Tabla 2. Análisis de regresión

Método	R ²	M	Intervalo de confianza (95 %) para m	
Temperatura base (TB)	0,17	-0,36	-0,67	-0,05
Triángulo sencillo (TS)	0,81	0,90	0,73	1,07
Triángulo doble (TD)	0,80	0,79	0,64	0,95
Seno sencillo (SS)	0,68	1,34	0,99	1,70
Seno doble (SD)	0,67	1,23	0,89	1,56

Método	B	Intervalo de confianza (95 %) para b		Error típico estimación
Temperatura base (TB)	16,88	13,68	20,08	0,88
Triángulo sencillo (TS)	2,07	0,34	3,82	0,48
Triángulo doble (TD)	3,19	1,57	4,80	0,44
Seno sencillo (SS)	-3,83	-7,50	-0,16	1,00
Seno doble (SD)	-2,67	-6,15	0,81	0,95

Los resultados obtenidos ratifican lo encontrado por Roltsch et al. (1999), quienes evaluaron diferentes métodos para la generación de GD y encontraron que las aproximaciones más complejas no se traducen en un cálculo más acertado de esta variable; sin embargo, se demostró que el método de la TB, el más sencillo de todos los métodos de cálculo, es poco apropiado para modelación de broca y café. De otro lado, es de anotar que, si bien Rodríguez et al. (2012) reportan que en Colombia los métodos más complejos de cálculo de GD ofrecen mejores aproximaciones, estos autores evaluaron el método de cálculo del corte horizontal, mientras que en este trabajo se evaluó el método del corte vertical.

Análisis de la tendencia

Los análisis descriptivos muestran que las mayores acumulaciones medias anuales de tiempo térmico para café se dan entre los 1.200 y 1.400 metros de altura sobre el nivel del mar (figura 2a), mientras que la mayor acumulación media anual de grados día broca se da por debajo de los 1.500 metros de altura sobre el nivel del mar (figura 2b), cifras muy relacionadas con las alturas óptimas para el crecimiento de estos organismos, reportadas por Jaramillo y Guzmán (1984) y por Constantino (2010), hecho que corrobora que el método utilizado (TS con el corte vertical), representa, en gran medida, lo observado en el campo.

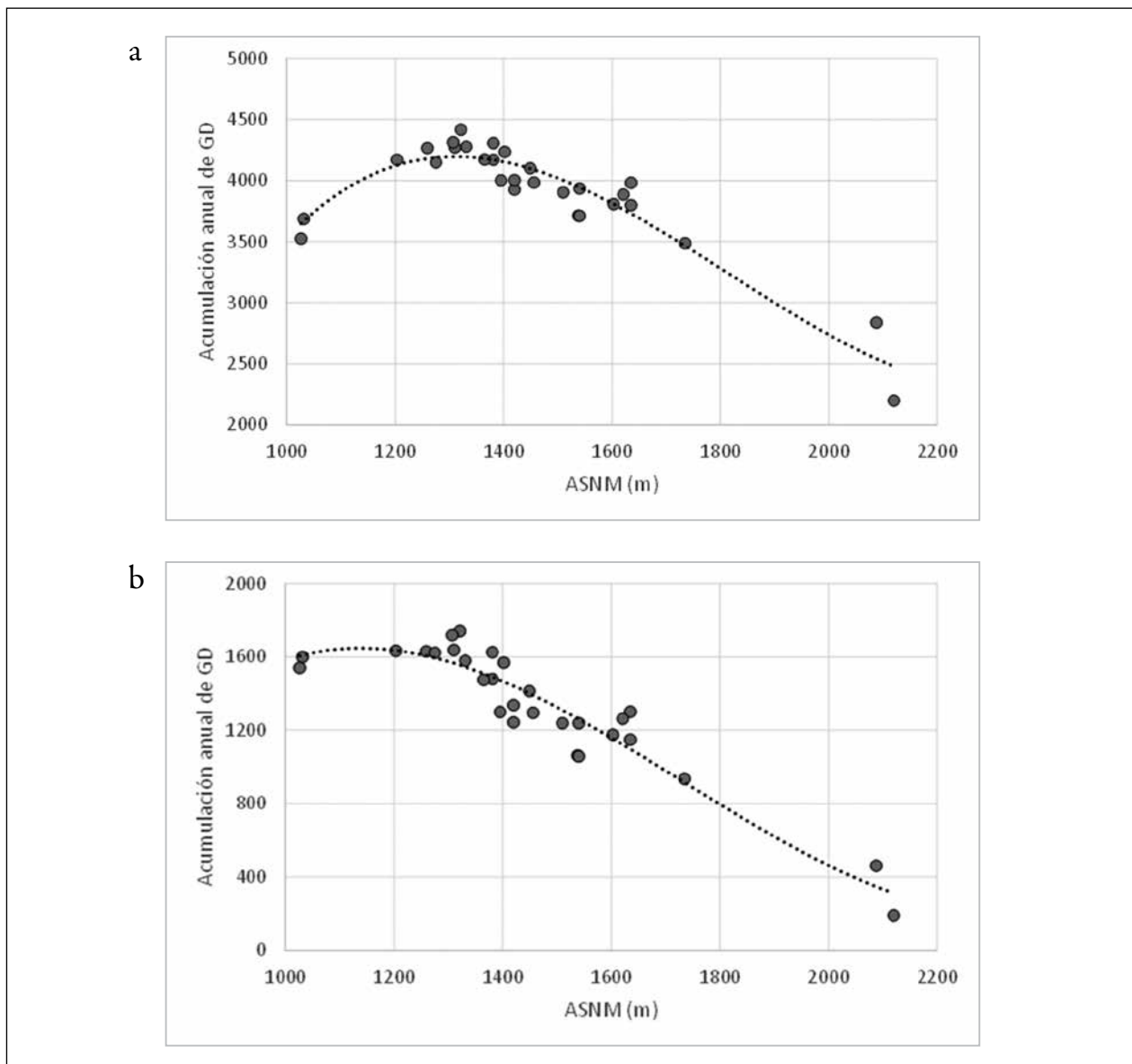


Figura 2. Acumulación media anual de tiempo térmico (GD) como función de la altura sobre el nivel del mar (a) café, (b) broca.

Grados día cafeto

El análisis de Mann-Kendall muestra que en la mayoría de estaciones analizadas se encuentra o existe por lo menos un mes del año en el que la acumulación de grados día

tiene tendencia significativa ($p < 0,05$). En 2 de las 28 estaciones no hay tendencia en ninguno de los meses, en otras 2 hay meses en los que la tendencia es negativa y en las 24 estaciones restantes predominan tendencias positivas (tabla 3).

Tabla 3. Valor de la tendencia de GD cafeto acumulado mensual.año⁻¹ (tendencias significativas con probabilidad superior al 95 %)

N.º	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	Ospina Pérez	0,40	0,35	0,38	0,32	0,31	0,28		0,48		0,55	0,43	0,43
2	Jorge Villamil	0,54	0,52	0,51	0,61	0,63	0,65	0,72	0,76	0,78	0,76	0,70	0,47
3	Manuel Mejía	0,27			0,32	0,15	0,21		0,35	0,31	0,50	0,27	0,14
4	Julio Fernández	0,43	0,58	0,67	0,68	0,73	0,64	0,69	0,66	0,50	0,62	0,58	0,51
5	Manuel M. Mallarino										0,40		
6	Heraclio Uribe									-0,66			
7	Granja Tibacuy	0,31			0,28	0,37	0,38	0,38	0,39	0,33	0,49	0,40	
8	Paraguaicito				0,54								
9	La Bella					0,70	0,58				0,54	0,38	
10	El Agrado			2,26			2,27						
11	Misiones				0,83	0,89	0,55	0,87	0,98	1,29	1,04		
12	Maracay				0,65	0,93				0,92	0,66		
13	Arturo Gómez				0,56	0,74	0,81				0,84	0,66	0,65
14	El Cedral		0,73	0,47	0,65	0,74	0,40		0,59	0,54	0,79	0,50	
15	La Catalina												
16	Albán					0,41				0,53	0,37		
17	La Trinidad	1,24	1,38	0,90	0,91	1,11	0,80	0,78	0,95	0,70	1,19	0,97	1,22
18	El Jazmín				0,50	0,93				0,55	0,80		
19	Naranjal				0,31	0,42	0,47	0,60		0,30	0,48	0,51	0,23
20	Cenicafé						0,33				0,25	0,27	
21	Llanadas												
22	Santa Helena						-0,87					-0,78	
23	Montelíbano	1,16	1,11	0,86	0,76	0,76	0,71			1,05	1,18	0,78	0,92
24	Rafael Escobar										0,78		
25	Agronomía			0,33	0,21	0,32	0,48	0,30	0,31		0,45	0,50	0,38
26	Miguel Valencia	0,52		0,38	0,57	0,64	0,67	0,50	0,58	0,67	0,84	0,70	0,42
27	Granja Luker										-1,01		
28	Santagueda			0,46	0,71			0,48					
29	El Rosario	0,78	0,87	0,71	0,66	0,84	0,63	0,57	0,70	0,86	1,01	0,75	0,73

En la figura 3 se observó cómo el incremento de las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de la planta de cafeto, expresada como el número de meses en que la tendencia es positiva, no está asociado totalmente con los sitios más altos (cercanos a los 2.000 msnm), donde se espera que, por efecto del calentamiento global, se desplace la caficultura (Laderach et al. 2011). De hecho, los sitios que tienen mayor número de meses con tendencia positiva están ubicados en la zona óptima actual, lo que muestra que el rango altitudinal existente

sigue manteniéndose favorable con el paso del tiempo. Es de anotar que, como se observa en la tabla 3, los meses en los que se presentan tendencias generalizadas al incremento del tiempo térmico, son los meses lluviosos (marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre), lo cual se explica en el hecho de que en estos meses se presenta un incremento general (significativo) de la temperatura mínima del aire, de acuerdo a los resultados expuestos por Pérez (2013).

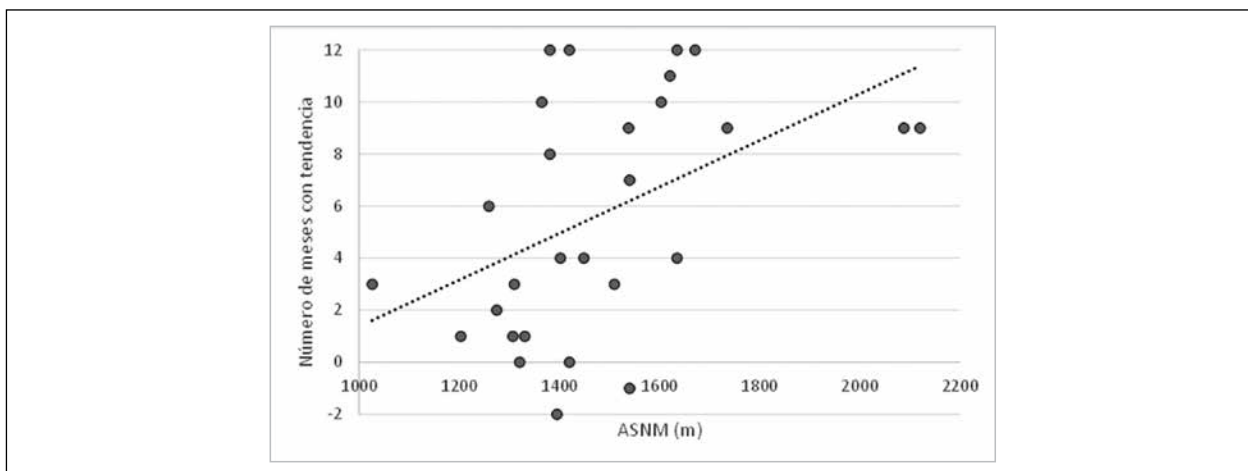


Figura 3. Relación entre la altura sobre el nivel del mar (asnm) y el número de meses con tendencia positiva (+) y negativa (-) en los GD cafeto.

Las estaciones que presentaron el mayor número de meses con tendencia positiva en los GD cafeto están relacionadas con las estaciones cuyos registros de temperatura máxima y mínima media del aire tienen tendencias incrementales significativas, de acuerdo a lo reportado por Pérez (2013). Este autor atribuye este comportamiento a la

tendencia incremental que ha tenido la temperatura superficial del océano Pacífico tropical en los últimos años (figura 4) y la relación positiva existente entre esta variable y la temperatura del aire (máxima y mínima) reportada no solo en la zona cafetera sino a escala nacional por Montealegre y León (2001).

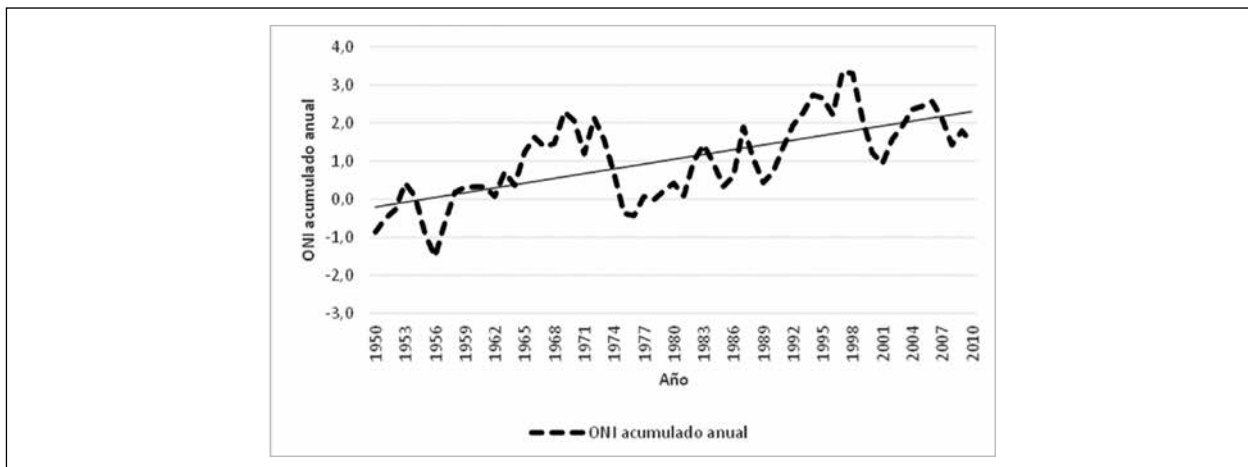


Figura 4. ONI acumulado anual, mostrando cómo en los últimos años 1980-2010 han predominado temperaturas altas sobre el océano Pacífico.

En la figura 5 se observó que durante los años del fenómeno de El Niño se incrementa la condición óptima para el crecimiento y el desarrollo del café por encima de los 1.400 metros de altura sobre el nivel del mar, mientras que por debajo de esta altura se restringe bajo condición del fenómeno de El Niño y se incrementa bajo condición de La Niña (figura 6). Esto quiere decir que el predominio

de las condiciones neutras y cálidas sobre el océano Pacífico tropical entre los años 1991 y 2000, incrementó la tendencia de tiempo térmico para el cafeto por encima de los 1.400 metros de altura sobre el nivel del mar (figura 3), razón por la cual hay pocos meses con tendencia positiva del tiempo térmico por debajo de los 1.300 metros de altura sobre el nivel del mar.

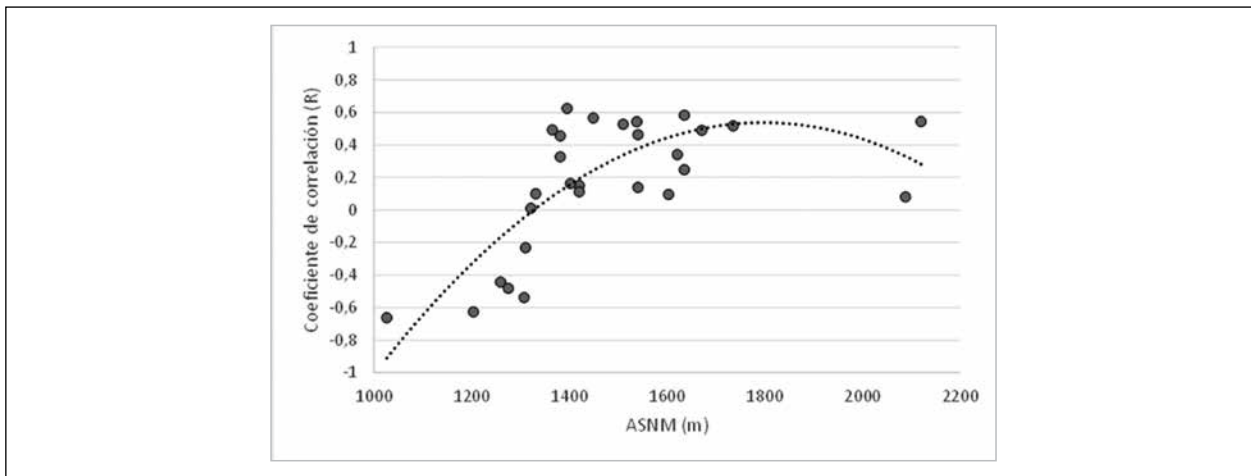


Figura 5. Relación entre la asnm y el coeficiente de correlación entre GD café y ONI.

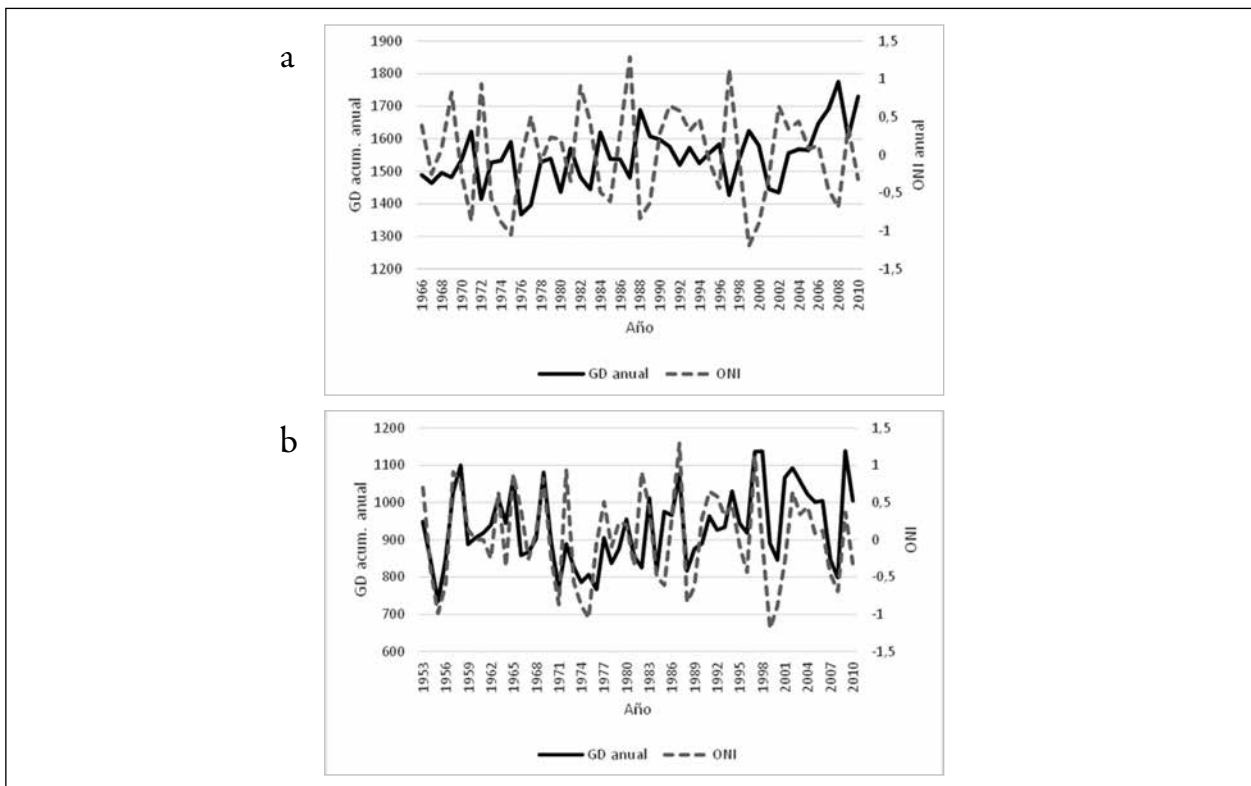


Figura 6. Relación entre el ONI y la acumulación anual de grados día café en dos alturas a. Santaguada (por debajo de los 1.400 msnm), donde la relación entre estas dos variables es negativa y b. Manuel Mejía (por encima de 1.400 msnm), donde la relación es positiva.

Grados día broca

La tendencia anual del acumulado mensual de grados día broca tiene un comportamiento similar a la que se encontró para los acumulados mensuales de los grados día cafeto (tabla 4). Las estaciones en las que no se encontró tendencia (La Catalina y Llanadas) y en las que se encontró tendencias negativas (Heraclio Uribe y Santa Helena) para los GD cafeto son exactamente las mismas que las estaciones que no tienen tendencia o tienen tendencia negativa para los GD broca.

La tendencia negativa que presentan las estaciones Heraclio Uribe y Santa Helena se explica en que, si bien las series tienen una longitud superior a 20 años, las series se cortan en los años 1991 y 1979, respectivamente. Según Pérez (2013), cuando las series se cortan en estos años, se encuentran tendencias negativas significativas en los valores de temperatura mínima media anual y temperatura máxima media anual. Esto se traduce en que la temperatura del aire no fue óptima para el crecimiento del cafeto y la broca entre finales de la década de los setenta y finales de la década de los ochenta.

Tabla 4. Valor de la tendencia de GD broca acumulado mensual.año-1 (tendencias significativas con probabilidad superior al 95 %)

N.º	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	Ospina Pérez	0,34	0,34	0,33	0,26	0,29			0,33		0,48	0,33	0,32
2	Jorge Villamil	0,62	0,56	0,48	0,62	0,60	0,66	0,65	0,70	0,73	0,72	0,66	0,45
3	Manuel Mejía		0,53			0,64					0,59	0,52	
4	Julio Fernández	0,36	0,54	0,59	0,66	0,63	0,58	0,56	0,57	0,48	0,50	0,53	0,40
5	Manuel M. Mallarino										0,33		
6	Heraclio Uribe									-0,56			
7	Granja Tibacuy				0,28	0,32	0,34	0,31	0,35	0,24	0,39	0,36	
8	Paraguaicito	0,25		0,25	0,18	0,17	0,23	0,24				0,21	0,25
9	La Bella					0,55	0,47				0,40		
10	El Agrado			0,82	0,60		0,99	0,52	0,97	0,67			0,77
11	Misiones				0,86	0,99		0,85	0,69	1,28	1,47		0,70
12	Maracay		0,53			0,64					0,59	0,52	
13	Arturo Gómez	0,34		0,32	0,47	0,60	0,55	0,37		0,27	0,54	0,43	0,48
14	El Cedral		0,32	0,24	0,30	0,39	0,21		0,36	0,34	0,32	0,19	
15	La Catalina												
16	Albán					0,35				0,36			
17	La Trinidad	1,15	1,43	0,93	0,88	1,06	0,66	0,65	0,72	0,64	1,01	0,90	1,13
18	El Jazmín					0,64					0,56		
19	Naranjal	0,31	0,31	0,27	0,37	0,38	0,43	0,33	0,19	0,28	0,39	0,45	0,25
20	Cenicafé	0,20		0,12	0,12	0,13	0,19		0,16	0,13	0,16	0,20	0,13
21	Llanadas												
22	Santa Helena							-0,90					
23	Montelíbano	1,05	1,22	0,91	0,75	0,77	0,78	0,26	0,65	1,05	1,15	0,69	0,88
24	Rafael Escobar												
25	Agronomía						0,25				0,20	0,23	
26	Miguel Valencia	0,36	0,28	0,28	0,48	0,53	0,55	0,35	0,39	0,55	0,57	0,61	0,35
27	Granja Luker			0,29	0,34								0,27
28	Santagueda	0,34		0,31	0,43	0,17	0,26	0,37		0,19		0,16	0,32
29	El Rosario	0,73	0,70	0,50	0,54	0,82	0,55		0,67	0,77	0,82	0,63	0,54

A su vez, se observó que no hay una relación entre la altura sobre el nivel del mar y la predominancia de tendencias, igual que sucede con GD cafeto (figura 7); de hecho, las estaciones ubicadas por debajo de los 1.500 metros de altura sobre el nivel del mar tienen el mayor número de meses con tendencia positiva, lo que muestra que no es generalizado un efecto incremental de las condiciones de temperatura del aire para el insecto en condiciones de mayor altura.

Pese a que no hay una tendencia significativa que muestre un incremento gradual de las condiciones óptimas de temperatura del aire para el crecimiento y desarrollo de la broca del café, es notorio un incremento de las condiciones favorables para su crecimiento durante los eventos del fenómeno de El Niño (ONI positivo) en alturas superiores a 1.400 metros sobre el nivel del mar (figura 8).

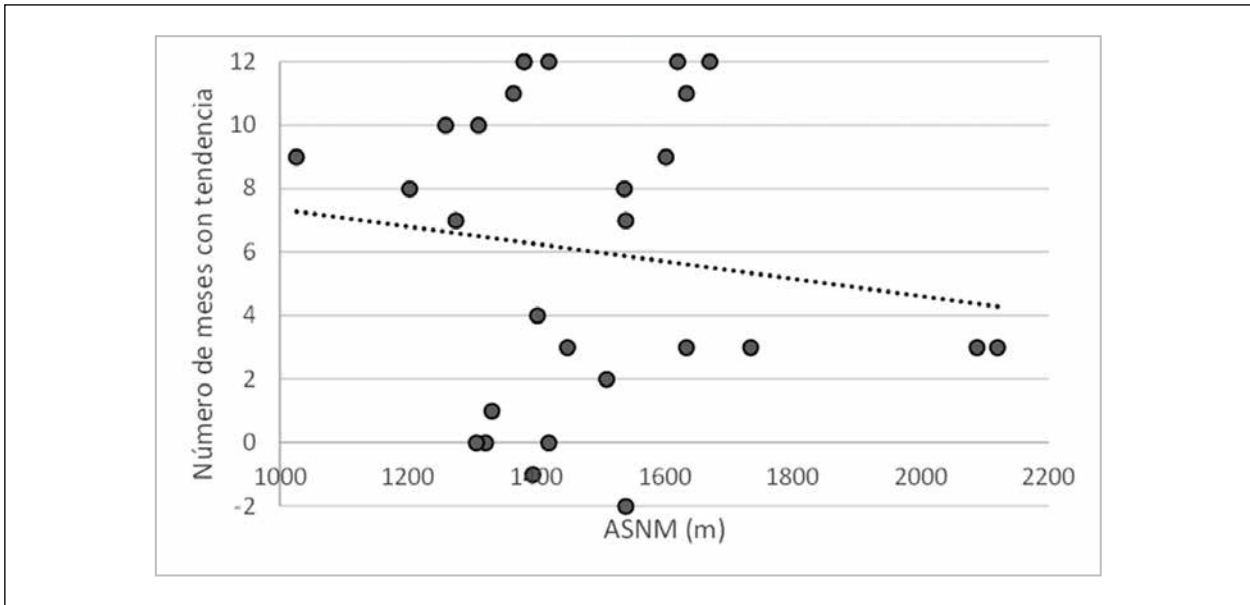


Figura 7. Relación entre la asnm y el número de meses con tendencia positiva (+) y negativa (-).

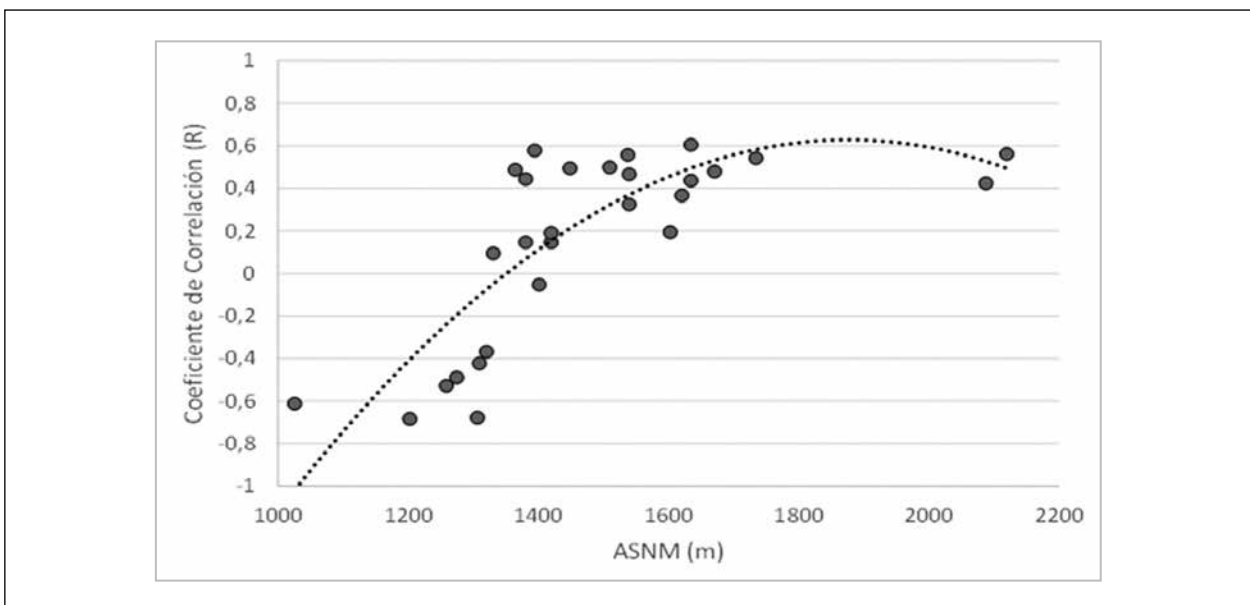


Figura 8. Relación entre la asnm y el coeficiente de correlación entre GD broca y ONI.

Conclusiones

- Se encontró que, en condiciones de la región ecuatorial andina colombiana, los métodos que consideran que el ciclo diario de la temperatura se asemeja a un triángulo o curva sinusoidal que puede ser representada como una función de los valores máximos y mínimos diarios de esta variable, son válidos.
- El método del corte vertical, que considera un cese en el crecimiento de las especies cuando la temperatura del aire supera los umbrales máximo y mínimo definidos para cada una de ellas, permitió corroborar las alturas óptimas para el crecimiento y desarrollo del café y la broca del café. Lo anterior es importante porque justifica el uso del tiempo térmico, expresado en grados día, como una variable capaz de identificar épocas y regiones de crecimiento óptimo de poiquilótermos y plantas.
- Hay un incremento generalizado del tiempo térmico en todas las estaciones analizadas. Sin embargo, las estaciones ubicadas a mayor altura sobre el nivel del mar tienen el mayor número de meses con tendencias incrementales significativas. En dichos sitios, la temperatura del aire está alcanzando valores que promueven el desarrollo y crecimiento de las especies en estudio. No obstante, el mayor número de meses con tendencia positiva se encuentra en la región óptima actual para café (entre 1.400 y 1.700 msnm) y para broca (por debajo de los 1.600 msnm).

- Hay un marcado efecto de El Niño y La Niña sobre la acumulación de tiempo térmico en ambas especies. Este efecto es diferencial; por encima de los 1.400 metros sobre el nivel del mar El Niño incrementa y La Niña disminuye las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las dos especies, mientras que por debajo de los 1.400 msnm El Niño reduce y La Niña aumenta las condiciones óptimas. De hecho, en las estaciones en las que se encontraron tendencias negativas o simplemente no se encontraron tendencias, este efecto se debe a que las series históricas se truncaron durante el predominio de bajas temperaturas en el océano Pacífico.

Agradecimientos

Este trabajo hizo parte de las actividades financiadas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural dentro del Convenio 0255, firmado entre el Ministerio y la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Los autores agradecen a estas instituciones, así como a los caficultores que dedican parte de su tiempo a coleccionar datos climáticos y a los auxiliares de la disciplina de agroclimatología del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), quienes ponen todo su empeño en pos de la calidad de los datos climáticos.

Referencias

- Allen J. 1976. A modified sine wave method for calculating degree days. *Environ Entomol.* 5(3):388-396.
- Constantino LM. 2010. La broca del café. Un insecto que se desarrolla de acuerdo con la temperatura y la altitud. *Brocarta* 39 [consultado 2014 feb]. <http://cafe-noticias.over-blog.com/article-la-broca-del-cafe-un-insecto-que-se-desarrolla-de-acuerdo-con-la-temperatura-y-la-altitud-54492018.html>.
- Federación Nacional de Cafeteros. 2012. Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2011. Bogotá: Federación Nacional de Cafeteros
- Fischer G, Shah M, Van Velthuizen H. 2002. *Climate Change and Agricultural Vulnerability*. Laxenburg: IIASA.
- Hamed KH. 2008. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *J Hydrol.* 349(3-4):350-363.
- Hipel KW, McLeod AI. 1994. *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Amsterdam: Elsevier [consultado junio, 2011]. <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/>.
- Jaramillo A, Guzmán O. 1984. Relación entre la temperatura y el crecimiento en *Coffea arabica* L., variedad caturra. *Revista Cenicafé.* 35(3):57-65.
- Jaramillo J, Chabi-Olaye A, Kamonjo C, Jaramillo A, Vega FE, Poehling HM, Borgemeister C. (2009). Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PlosOne* [consultado 2014 feb]; 4(8):e6487. <http://www.plosone.org/article/abstract?uri=info%3AAdoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0006487&representation=PDF> doi:10.1371/journal.pone.0006487.
- Jones HG. 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. 2.a edición. Cambridge: Cambridge University Press.
- Laderach P, Lundy M, Jarvis A, Ramírez J, Pérez M, Schepp K. 2011. Predicted impact of climate change on coffee supply chains. En: Leal W, editor. *The economic, social and political elements of climate change*. Hamburgo: Springer. pp. 703-724.
- Lindsey A, Newman J. 1956. Use of official weather data in spring time-temperature analysis of an Indiana phenological record. *Ecology.* 37:812-823.

- Montealegre JE, León GE. 2001. La temperatura del aire en Colombia: parte VI comportamiento de la temperatura del aire en Colombia durante las fases cálidas y frías del Pacífico. Bogotá: Ideam.
- Peña AJ, Arce BA, Boshell F, Paternina MJ, Ayarza MA, Rojas EO. 2011. Trend analysis to determine hazards related to climate change in the Andean agricultural areas of Cundinamarca and Boyacá. *Agron Colomb*. 29(2): 275-285.
- Pérez E. 2013. Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana [tesis]. [Santa Rosa de Cabal]: Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal (Unisarc).
- Prela A, Lozada B, Pereira A. 2006. Variação de graus-dia em Piracicaba (SP), em anos de El Niño e La Niña. *Bragantia*. 65(3):527-532.
- Ramírez V, Jaramillo A. 2009. Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia. *Cenicafé*. 60(2):161-172.
- Ramírez-Villegas J, Salazar M, Jarvis A, Navarro-Racines CE. 2012. A way forward on adaptation to climate change in Colombian agriculture: perspectives towards 2050. *Clim Chang*. 115(3-4):611-628.
- Riaño NM. 2010 sin publicar. Ajuste validación y ampliación del modelo de crecimiento y captura de carbono para especies en el trópico-CREFT.
- Rodríguez D, Cotes J, Cure J. 2012. Comparison of eight degree-days estimation methods in four agroecological regions in Colombia. *Bragantia*. 71(2):299-307.
- Roltsch WJ, Zalom F, Strawn A, Strand J, Pitcairn M. 1999. Evaluation of several degree-day estimation methods in California climates. *Int J Biometeorol*. 42(4):169-176.
- Sevacherian V, Stern VM, Mueller AJ. 1977. Heat accumulation for timing Lygus control measures in a safflower-cotton complex. *J Econ Entomol*. 70(4):399-402.
- Taylor F. 1981. Ecology and evolution of physiological time in insects. *Amer Naturalist*. 117(1):1-23.