

Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana

Recibido: 24 de mayo de 2013. Aceptado en versión final: 14 de mayo de 2015.

Edna Paola Pérez Rendón*

Víctor Hugo Ramírez Builes**

Andrés Javier Peña Quiñones***

Resumen. La zona cafetera colombiana está ubicada enteramente en el hemisferio norte, entre los 1 y 11° grados de latitud, sobre la cordillera de los Andes. Esta condición (ecuatorial andina) ha hecho que se dé por sentado que la variación temporal de la temperatura es mínima y que por ello, en su mayor parte la variabilidad de este elemento es espacial, atribuible casi exclusivamente a los cambios en altura sobre el nivel del mar. En este estudio se exploran factores de variación alternas, que muestran cómo, además de la

altitud, otros factores, como la latitud, la zona de convergencia intertropical, El Niño Oscilación del Sur y el Cambio Climático, inciden sobre esta variable climática, que a su vez ejerce un papel fundamental sobre las plantaciones de café.

Palabras clave: Variabilidad climática, Cambio Climático, ZCIT, ENOS.

Spatial and temporal variability of the air temperature in the Colombian coffee growing zone

Abstract. The Colombian coffee zone is located entirely in the northern hemisphere, between 1 and 11 degrees of latitude, in the Andean mountains. This condition (equatorial) has led people to think that the temporal variation of air temperature is minimal and that the greater variability of this element is given in the spatial scale, almost exclusively attributable to changes in altitude. By using descriptive statistics, cluster analysis, and linear regression, we explore alternate sources of variation in the air temperature, showing

how, also the altitude there are other variation sources. We found that the altitude is a main modulator of the air temperature; however, the effect depends on the latitude. The lowest weather station (903 meters above sea level and at 8°N) does not have the highest air temperatures. The hottest station is at 1 026 meters above sea level but nearest the equator (0°N), showing a latitudinal effect when the latitude is greater than 7°. This effect is greater for minimum temperatures than for maximum. The Inter-Tropical Confluence

* Corporación Universitaria UNISARC, Santa Rosa de Cabal (Risaralda), Kilómetro 4, Vía Santa Rosa de Cabal (Risaralda) - Chinchiná (Caldas), E-mail: ednapao@gmail.com

** Plataforma Café, Yara Colombia, Bogotá (DC), Carrera 11 # 94 A-34, Piso 3. E-mail: victor.ramirez@yara.com

*** Washington State University, Prosser (Washington), AgweatherNet Program, 24106 N Bunn Road. E-mail: andres.penaquinones@wsu.edu

Cómo citar:

Pérez R., E. P., V. H. Ramírez B. y A. J. Peña Q. (2016), "Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 89, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 23-40, [dx.doi.org/10.14350/rig.38707](https://doi.org/10.14350/rig.38707)

Zone (ITCZ) can modulate the air temperature. In most of the stations located between 2 and 7°N, the air temperature gets maximum values when the ITCZ is in its extreme North and South positions. It means, between December and January and between July and September, maximum temperatures tend to be higher than in any other month. Minimum temperatures are not affected by ITCZ as much as maximum temperatures are, indicating that this variable is impacted by the day-night cycle more than for the ITCZ. El Niño Southern Oscillation affects the air temperature in the coffee zone. During “El Niño”, the air temperature increases, while it decreases during “La Niña” events. However, there is a higher relation between maximum air temperatures and ENSO than between this phenomenon and the minimum air temperatures. The effect of this phenomenon on the air

temperature is higher during the first semester of the year, specifically between January and March. On the other hand, there is evidence to think that the air temperature is changing in the analyzed stations. For example, 47% of the analyzed stations exhibit changes (trends) in maximum air temperature values. Most of the trends are positive (air temperature increasing), but there are some places where the values have been decreasing. However, 84% of the analyzed minimum air temperature series have significant trends. Most of the locations have been seeing increasing air temperature values over the last decades.

Key words: Climate variability, Climate Change, ITCZ, ENSO.

INTRODUCCIÓN

La zona cafetera colombiana se extiende en torno a la cadena montañosa de los Andes, que en este país está dividida en tres ramales o cordilleras (que lo atraviesan de sur a norte) y alrededor de la sierra nevada de Santa Marta, sistema montañoso aislado de los Andes ubicado en la región caribe (Figura 1). Específicamente, esta zona se ubica en los 1 000 y 2 000 msnm, donde se encuentran las condiciones óptimas para el cultivo del café. Como resultado

de su ubicación geo-astronómica (entre los 01°00' y los 11°00' de latitud Norte) la amplitud anual de la temperatura del aire medida en cualquier punto de la geografía cafetera en particular (y de la geografía colombiana en general) es mínima, de tal forma que la diferencia entre los valores anuales de la temperatura mínima absoluta y la temperatura máxima absoluta, medida en cualquier localidad es muy baja, en comparación con las amplitudes registradas en latitudes más altas (Ramírez y Goyal, 2008; Peña *et al.*, 2011). Si bien, en la escala temporal hay una

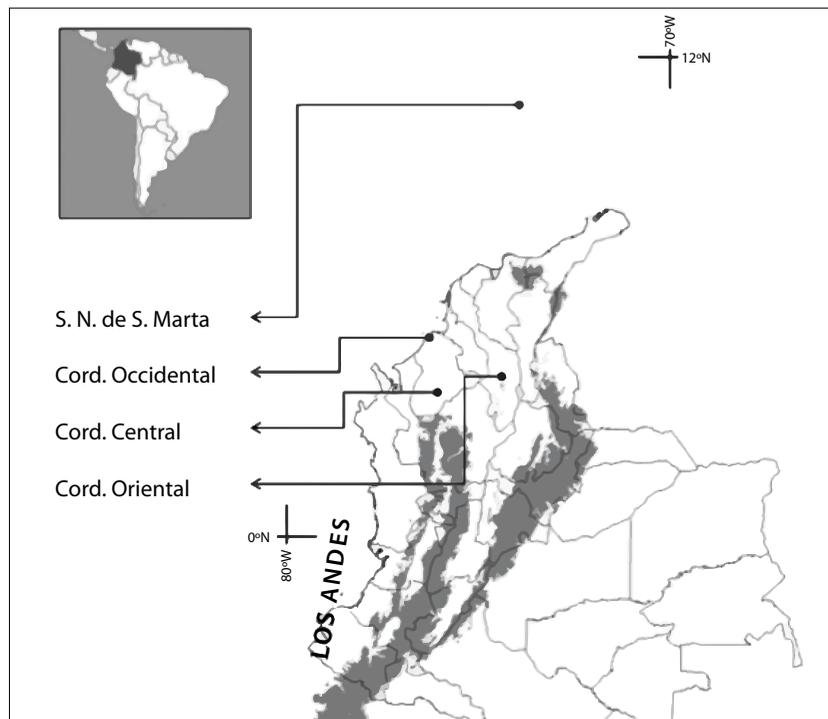


Figura 1. Zona cafetera colombiana en el contexto de la geografía del país.

uniformidad en los datos medios de temperatura, a nivel espacial hay grandes diferencias, las cuales se atribuyen a los cambios de altitud, de tal forma que la relación inversa entre la altura sobre el nivel del mar y la temperatura del aire permite a las personas del común diferenciar las “tierras frías” a mayor altitud y la “tierra caliente” en zonas bajas (Pabón *et al.*, 2001).

El hecho de que se considere que, por nuestra condición ecuatorial, la temperatura del aire es poco variable en el tiempo, los estudios que buscan encontrar una relación entre fenómenos moduladores del clima y los elementos meteorológicos han dado mayor relevancia a la lluvia, elemento climático más variable, y dejan de lado la temperatura del aire, variable que tiene un efecto directo sobre las plantas (Gregory, 1992; Grierson, 1995; Gliessman, 2007) y por ello cambios o variaciones pequeñas de ésta pueden incidir drásticamente en los rendimientos de los cultivos.

En el caso del cafeto, que con cerca de un millón de hectáreas sembradas sigue siendo el cultivo más importante para el país (DANE, 2012), se ha encontrado que la temperatura del aire tiene gran influencia sobre el crecimiento y desarrollo de la especie; por ejemplo López *et al.* (1972) reportan que las plantaciones de variedad Caturra (libre exposición) ubicadas en zonas cercanas a los 2 000 msnm (menor temperatura ambiental) tienen menor crecimiento (2.5 veces inferior) que las plantaciones ubicadas a 1 000 msnm; Jaramillo y Guzmán (1984) encontraron que la temperatura ambiental determina el tiempo (días) transcurrido entre la siembra y la primera cosecha del cafeto, siendo menor en sitios que tienen temperaturas más altas, mientras que Jaramillo y Valencia (1980) determinaron que los incrementos en *altura de planta* y en *longitud de ramas* están determinados, en gran medida, por la temperatura del aire.

En este documento se hace un análisis de la variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana a partir de datos diarios, provenientes de estaciones meteorológicas de la red de estaciones de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). El objetivo es cuantificar las variaciones de este elemento asociadas con la altitud (ASNM), con la zona de convergencia in-

tertropical (ZCIT), principal modulador intraanual del clima de Colombia (León *et al.*, 2000), con El Niño Oscilación del Sur (ENOS), reportado por Peña *et al.* (2001) como el principal modulador interanual de la temperatura del aire y con el cambio climático (CC), que determina que en algunos sitios la temperatura del aire tenga tendencias significativas, ya sean positivas o negativas (Rojas *et al.*, 2010).

MÉTODOS

Se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y temperatura mínima del aire, depurados y verificados por el servicio meteorológico de la FNC (Disciplina de Agroclimatología del Centro Nacional de Investigaciones de Café—CENICAFÉ), provenientes de 34 estaciones meteorológicas, que cuentan con registros históricos superiores a 22 años, ubicadas en 13 departamentos de la zona cafetera colombiana (Tabla 1, Figura 2).

En el análisis primario de los datos se efectuaron cálculos estadísticos básicos y análisis gráficos para obtener las temperaturas máximas medias y mínimas medias multianuales en escalas mensuales y anuales. Los datos obtenidos se analizaron en función de cuatro factores generadores de variabilidad en los registros de temperaturas, es decir, ASNM, ZCIT, ENOS y CC.

Para el análisis de la temperatura del aire en función de la ASNM se relacionaron linealmente la altitud, en metros, de las estaciones meteorológicas y los datos medios anuales multianuales de las temperaturas máximas y mínimas medias; además de esto, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple para relacionar la temperatura con la ASNM y la latitud, con miras a refinar los modelos. Para analizar el efecto de la ZCIT sobre la temperatura del aire se identificaron los comportamientos característicos medios de los datos máximos y mínimos medios mensuales de cada estación meteorológica a través del año. Se tuvo en cuenta que la presencia de estos patrones se asocian al movimiento medio de la ZCIT, la cual sigue el movimiento aparente del Sol, moviéndose entre sus posiciones extremas (7° Sur y 11° Norte) entre enero y diciembre como plantean León *et al.* (2000). Los valores medios

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis

No.	Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud	Long. Serie
1	Ospina Pérez	Consacá	Nariño	1° 15' N	77° 29' W	1 603	1 953 – 2 010
2	Jorge Villamil	Gigante	Huila	2° 20' N	75° 31' W	1 420	1 955 – 2 010
3	Manuel Mejía	El Tambo	Cauca	2° 24' N	76° 44' W	1 735	1 953 – 2.010
4	Julio Fernández	Restrepo	Valle	3° 49' N	76° 32' W	1 381	1 954 – 2.010
5	Manuel M. Mallarino	Trujillo	Valle	4° 13' N	76° 19' W	1 331	1 969 – 2 010
6	Heraclio Uribe	Sevilla	Valle	4° 17' N	75° 55' W	1 540	1 954 – 1 991
7	Granja Tibacuy	Tibacuy	Cundinamarca	4° 22' N	74° 26' W	1 538	1 952 – 2 010
8	Paraguaicito	Buenavista	Quindío	4° 24' N	75° 44' W	1 203	1 963 – 2 010
9	Chapeton	Ibagué	Tolima	4° 28' N	75° 16' W	1 353	1 955 – 1 986
10	La Bella	Calarcá	Quindío	4° 30' N	75° 40' W	1 449	1 976 – 2 010
11	El Agrado	Montenegro	Quindío	4° 31' N	75° 48' W	1 275	1 987 – 2 010
12	Misiones	Mesitas del colegio	Cundinamarca	4° 33' N	74° 26' W	1 540	1 978 – 2 010
13	Maracay	Quimbaya	Quindío	4° 36' N	75° 44' W	1 402	1 982 – 2 010
14	Arturo Gómez	Alcalá	Valle	4° 40' N	75° 47' W	1 259	1 967 – 2 010
15	El Cedral	Pereira	Risaralda	4° 42' N	75° 32' W	2 120	1 968 – 2 010
16	La Catalina	Pereira	Risaralda	4° 45' N	75° 44' W	1 321	1 987 – 2 010
17	Alban	El Cairo	Valle	4° 47' N	76° 11' W	1 510	1 975 – 2 010
18	La Trinidad	Líbano	Tolima	4° 54' N	75° 02' W	1 456	1 976 – 2 010
19	El Jazmín	S. Rosa de Cabal	Risaralda	4° 55' N	75° 37' W	1 635	1 975 – 2 010
20	Naranjal	Chinchiná	Caldas	4° 58' N	75° 39' W	1 381	1 956 – 2 010
21	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	5° 00' N	75° 36' W	1 310	1 950 – 2 010
22	Llanadas	Manzanares	Caldas	5° 12' N	75° 08' W	1 420	1 956 – 1 979
23	Santa Helena	Marquetalia	Caldas	5° 19' N	75° 00' W	1 395	1 981 – 2 010
24	Montelibano	Yacopí	Cundinamarca	5° 27' N	74° 20' W	1 365	1 971 – 2 010
25	Rafael Escobar	Supía	Caldas	5° 27' N	75° 38' W	1 307	1 982 – 2 004
26	Agronomía	Manizales	Caldas	5° 03' N	75° 30' W	2 088	1 956 – 2 010
27	Miguel Valencia	Jardín	Antioquia	5° 36' N	75° 51' W	1 621	1 956 – 2 010
28	Granja Luker	Palestina	Caldas	5° 04' N	75° 41' W	1 031	1 972 – 2 010
29	Santagueda	Palestina	Caldas	5° 04' N	75° 40' W	1 026	1 965 – 2 010
30	Bertha	Moniquirá	Boyacá	5° 53' N	73° 34' W	1 677	1 953 – 2 010
31	El Rosario	Venecia	Antioquia	5° 58' N	75° 42' W	1 635	1 967 – 2 010
32	Blonay	Chinácota	N. Santander	7° 34' N	72° 37' W	1 250	1 951 – 2 010
33	Francisco Romero	Salazar	N. Santander	7° 44' N	72° 47' W	903	1 955 – 2 010
34	Pueblo Bello	Pueblo Bello	Cesar	10° 25' N	73° 34' W	1 134	1 958 – 2 010

mensuales de cada variable para cada estación, es decir, dos matrices de tamaño 12x34, se analizaron utilizando el método de conglomeración de Ward y la distancia euclidiana, como reportan Peña *et al.* (2014). En ese sentido se definieron grupos de estaciones con comportamiento intraanual similar. Para el análisis de ENOS sobre la temperatura del aire se siguió la metodología sugerida por Peña *et al.* (2012) en la que se evalúa el grado de incidencia de

este fenómeno sobre el clima local utilizando como indicador la correlación entre el Índice Oceánico de El Niño (ONI), publicado mensualmente por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y las temperaturas máximas y mínimas medias registradas en las estaciones meteorológicas a escala anual y mensual. Es de anotar que el ONI representa la desviación de la temperatura superficial del Océano Pacífico con respecto a un

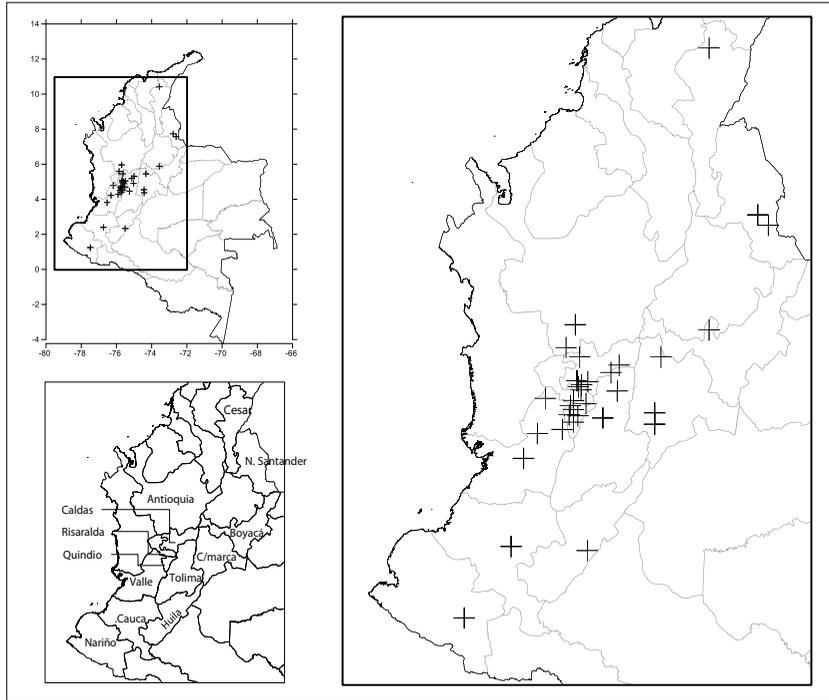


Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

periodo de referencia y por ende se constituye en la principal medida para hacer seguimiento a El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), (Ramírez y Jaramillo, 2009). Para determinar la existencia de CC se hizo un análisis de tendencia de las series medias anuales de temperatura máxima y temperatura mínima. Se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, técnica considerada como una de las más robustas para determinar la existencia de tendencias significativas en series temporales (Onoz y Bayazit, 2003; Hamed, 2008; Peña *et al.*, 2011).

RESULTADOS

Altura sobre el nivel del mar

La Figura 3 muestra el efecto de la ASNM sobre la temperatura del aire; a mayor altitud, menor temperatura; no obstante las tasas de cambio de la temperatura con la ASNM dependen de la variable analizada (temperatura máxima o temperatura mínima). En el caso de la temperatura máxima media anual, la tasa de cambio es de -0.7°C por cada 100 m de altitud, mientras que para la temperatura

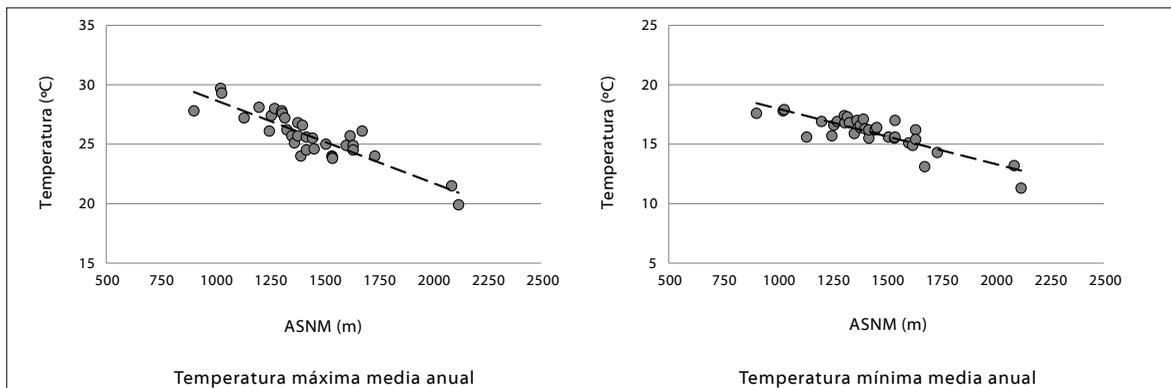


Figura 3. Relación de la temperatura con la altura, según la información de las 34 estaciones meteorológicas analizadas.

mínima media anual la tasa es de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m. Pese a esto, la estación Francisco Romero que tiene la menor altura sobre el nivel del mar (903 m) no tiene las temperaturas medias anuales más altas de las estaciones analizadas, siendo la estación Santaguada, ubicada a 1 026 msnm, la más calurosa (Figura 4).

Tal comportamiento, en el que la estación de Norte de Santander, ubicada a menor ASNM, tiene temperaturas más bajas que la estación Santaguada (Caldas), que se encuentra 123 m más alta, puede estar asociado con la latitud y se explica en el hecho de que a 7° norte hay un efecto latitudinal que determina una temperatura más alta a mitad de año (verano del hemisferio norte) y una temperatura más baja entre diciembre y enero (invierno del hemisferio norte), como se observa en la Figura 5. La temperatura baja a principio y final de año, cuando el Sol se encuentra aparentemente sobre

el hemisferio sur, afecta los datos de temperatura media anual de la estación Francisco Romero haciéndola más fría que la estación Santaguada.

Este comportamiento de la temperatura a través del año define la diferencia entre las estaciones ecuatoriales, ubicadas muy cerca de los 0° de latitud, donde las diferencias térmicas a través del año son mínimas y las estaciones ubicadas más al norte, que tienen diferencias de temperatura importante entre las épocas más frías (a principio y final de año) y las más calurosas, a mitad de año (Figura 6).

Al relacionar linealmente las temperaturas máxima media y mínima media anual con la latitud y la altura sobre el nivel del mar se encuentra que la temperatura mínima media (no tanto la máxima media) de la zona cafetera colombiana depende en gran medida de la latitud. Aunque se trata de un análisis preliminar (ya que solo se considera información de 34 estaciones), éste muestra que la tem-

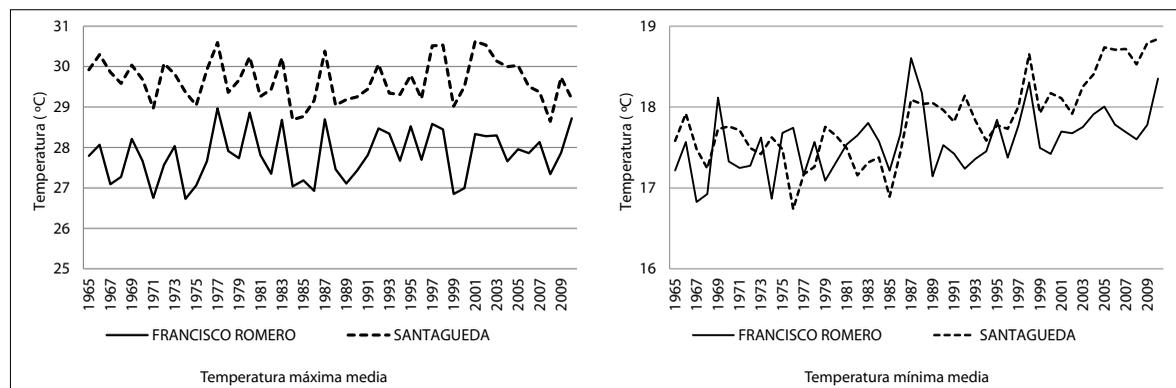


Figura 4. Comportamiento de la temperatura del aire en los últimos 45 años en las estaciones Santaguada y Francisco Romero.

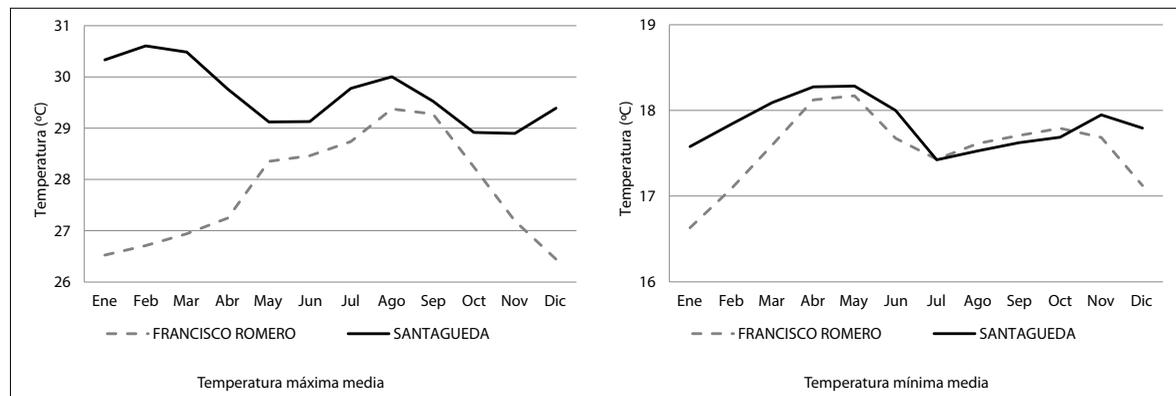


Figura 5. Comportamiento medio de la temperatura del aire a través del año en las estaciones Santaguada y Francisco Romero.

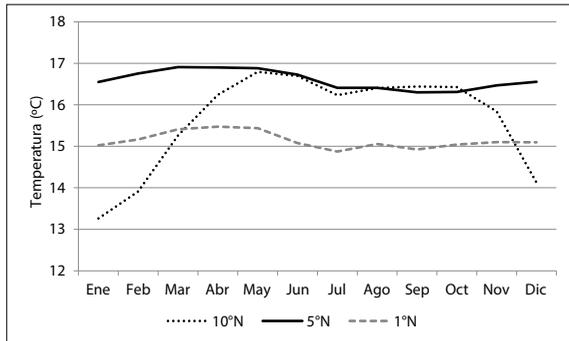


Figura 6. Fluctuación de la temperatura mínima media mensual al interior del año como función de la latitud. Las estaciones analizadas son Ospina Pérez (1°N), Cenicafé (5°N) y Pueblo Bello (10°N).

peratura máxima media anual disminuye 0.065° C por cada grado de latitud; mientras que la temperatura mínima media anual se reduce 0.216° C en la medida que se incrementa un grado de latitud, como se muestra en la Tabla 2.

Zona de Convergencia Inter-Tropical

La ZCIT es una banda nubosa que se mueve de sur a norte siguiendo el movimiento aparente del Sol, por lo que pasa sobre el centro del territorio colombiano en dos ocasiones cada año, mientras que sobre el norte y el sur del país lo hace una vez, generando diferencias en la distribución intraanual de las lluvias. Esto explica el hecho de que en el centro del país se presenten dos temporadas lluviosas por año y una sola temporada lluviosa por año en el norte y en el sur (León *et al.*, 2000). Los análisis realizados muestran que la temperatura máxima media y la temperatura mínima media mensual responden a

Tabla 2. Resultado de la regresión lineal múltiple que relaciona la temperatura mínima media anual y la máxima media anual con la latitud y la altitud

Estadísticos de la regresión	T _{máx}	T _{mín}
Coefficiente de correlación múltiple	0.877	0.875
Coefficiente de determinación (R ²)	0.769	0.765
Valor crítico de F	0.000	0.000
Ecuación de regresión	T _{máx}	T _{mín}
Latitud	-0.064	-0.214
Altitud	-0.007	-0.005
Intercepto	36 169	24 361

este fenómeno y en tal sentido se identifican tres grupos básicos que caracterizan el comportamiento de estas variables a través del año. Con respecto a la temperatura máxima; el primer grupo de estaciones tiene los máximos cuando la ZCIT está en su posición más sur y por ende a este grupo pertenecen principalmente localidades ubicadas por encima de los 4° norte, que se caracterizan por presentar mayores temperaturas máximas medias mensuales entre febrero y marzo con un descenso de la misma hasta octubre-noviembre (Figuras 7a y 9a). El segundo grupo de estaciones se caracteriza por tener los datos más altos de temperatura máxima media entre agosto y septiembre, cuando la ZCIT se encuentra en su posición más norte y los valores más bajos entre noviembre y diciembre (cuando la ZCIT está cerca de su posición más sur); es decir, hay un incremento gradual de la temperatura máxima media del aire desde diciembre hasta agosto-septiembre y un decremento de esta misma variable desde agosto-septiembre hasta noviembre-diciembre (Figuras 7b y 9a), comportamiento típico de las estaciones del sur de la zona cafetera, que tienen una temporada seca más fuerte a mitad de año. En las estaciones del departamento de Norte de Santander el cambio entre estas temporadas (agosto-septiembre y noviembre-diciembre) es más marcado que en el resto de la zona cafetera (Figuras 7c y 9a) y no está asociado con la ZCIT sino con su posición norte. El tercer grupo de estaciones se caracteriza por tener dos picos de temperatura máxima media mensual con similar magnitud a través del año, así como dos mínimos. Este comportamiento es típico de estaciones ubicadas entre 3 y 4° norte y los máximos están asociados con las posiciones extremas (norte y sur) de la ZCIT (enero-marzo y julio-septiembre), como se observa en la Figura 7d.

Los tres grupos que resumen el comportamiento intraanual de la temperatura mínima media mensual tienen las siguientes características: el primer grupo, en el que se encuentran las estaciones ubicadas más al norte tienen la particularidad de que los menores valores de temperatura mínima se encuentran en enero y los mayores en mayo; no obstante los valores de la temperatura mínima en la estación Pueblo Bello oscilan más durante el año que en las otras estaciones (Figuras 8a y 9b). En el

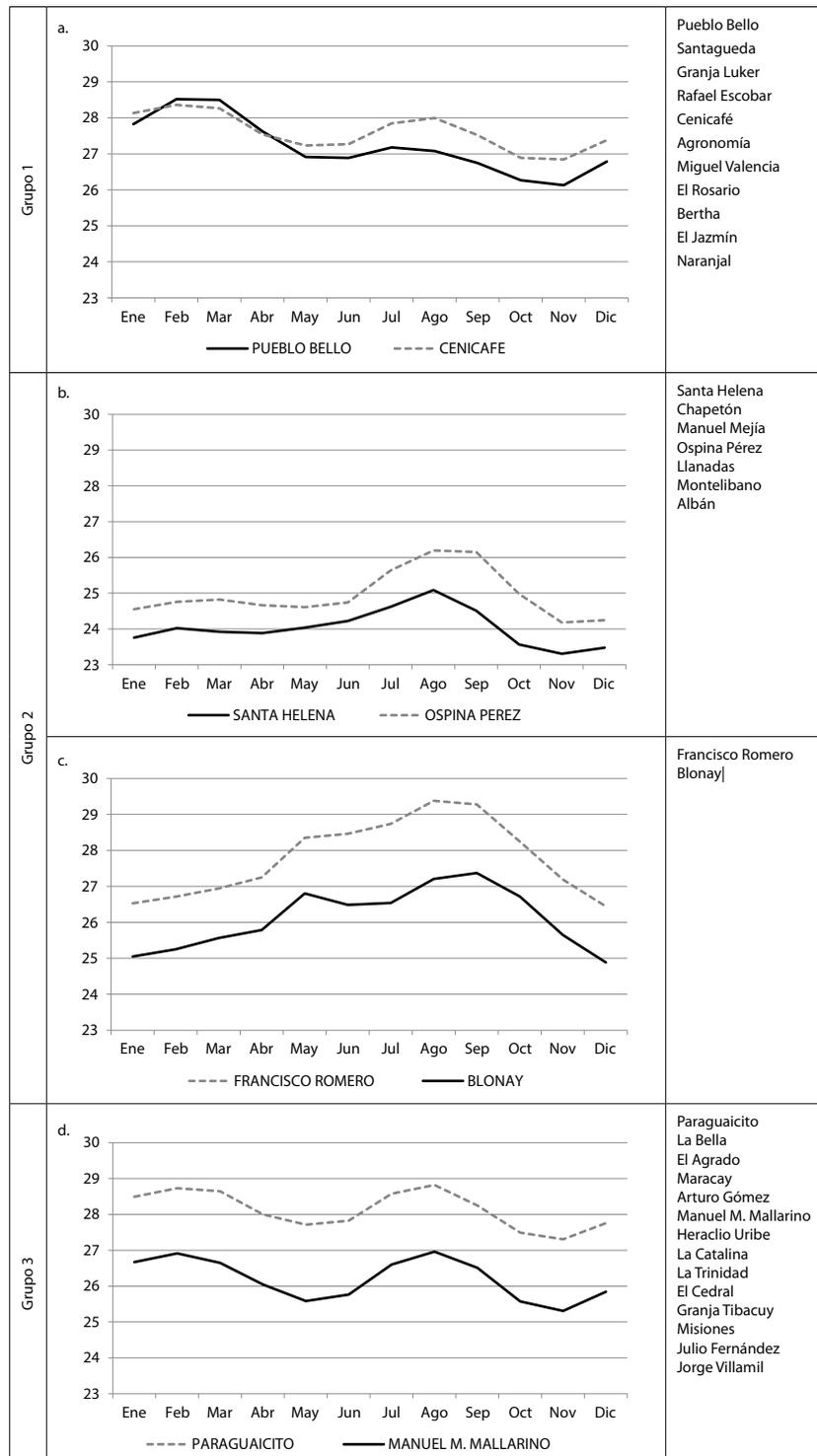


Figura 7. Comportamiento intra-anual de la temperatura máxima media en la zona cafetera colombiana y estaciones por grupo.

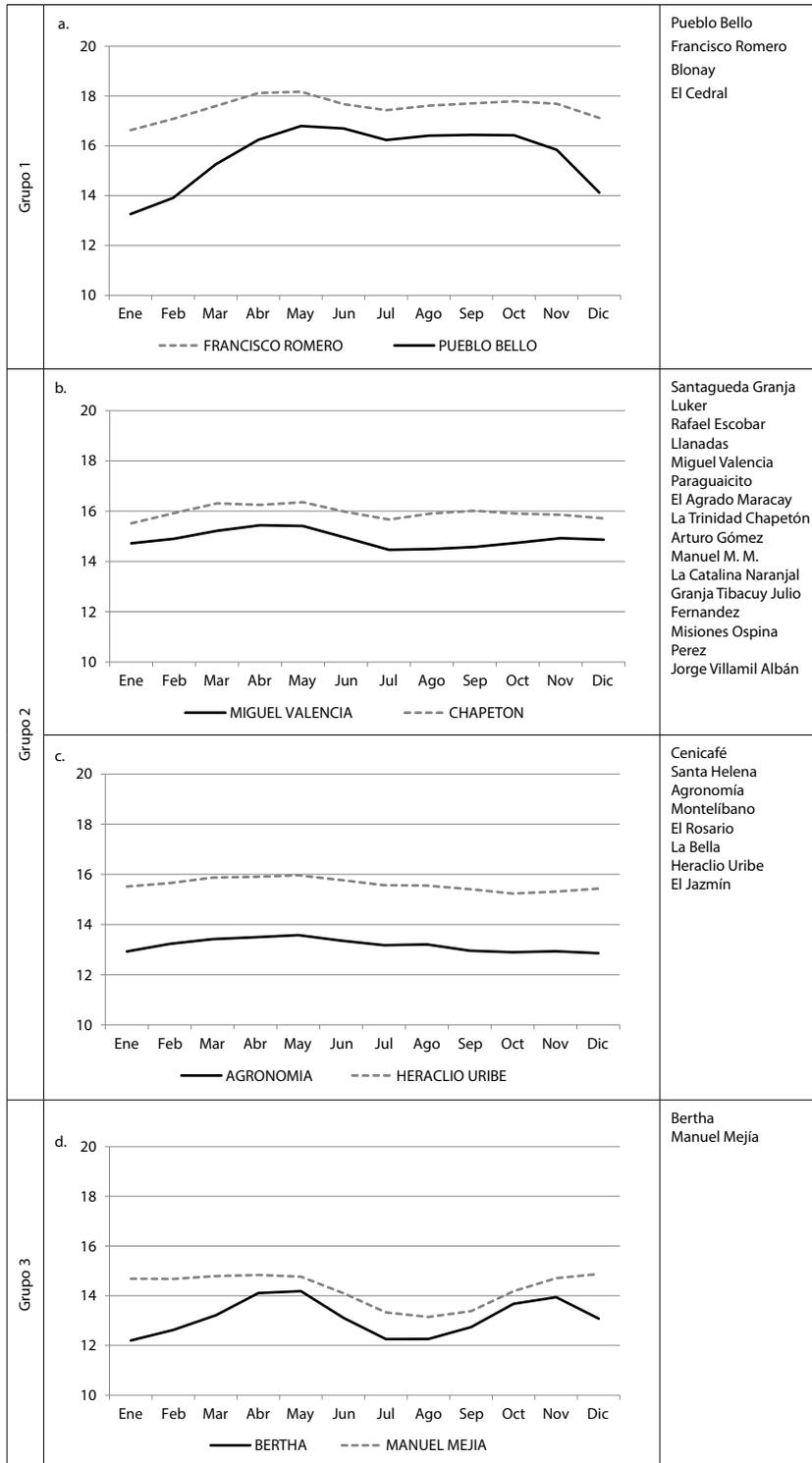


Figura 8. Comportamiento intra-anual de la temperatura mínima media en la zona cafetera colombiana y estaciones por grupo.

segundo grupo se encuentran las estaciones en las que el valor de esta variable no se altera significativamente a través del año (inferior a un grado); sin embargo, dentro de este grupo se detectan dos comportamientos, aquellas estaciones en las que el segundo semestre tiene las menores temperaturas mínimas (Figuras 8b y 9b) y las que tienen un máximo de esta variable en mayo y un mínimo en octubre (Figura 8c).

El Niño Oscilación del Sur

En la escala anual se observa que El Niño trae consigo un aumento generalizado de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana, mientras que los periodos La Niña se caracterizan por presentar temperaturas más bajas (coeficientes de correlación positivos). No obstante, se observa que, con excepción de las estaciones Agronomía, Misiones, Pueblo Bello y Santa Helena, la temperatura máxima media está más relacionada con el ENOS que la temperatura mínima media (Figura 10). Resulta de especial interés la estación Pueblo Bello, ubicada

en el norte, donde el efecto del ENOS sobre las temperaturas es menor que en el resto de estaciones.

Debe aclararse que el efecto del fenómeno ENOS sobre la temperatura del aire se acentúa en algunos meses del año y sobre la temperatura máxima lo hace entre diciembre y marzo, mientras que sobre la temperatura mínima el efecto es generalizado durante el primer semestre del año. Esto se traduce en que bajo condición El Niño se presentan los días más cálidos durante el primer trimestre (enero-marzo), mientras que los días más fríos, asociados con La Niña, se presentan durante el primer semestre (enero-julio), (Figura 11).

Señales de cambio climático

La Tabla 3 y la Figura 12a muestran que en el 47% de las estaciones analizadas la temperatura máxima media anual tiene tendencia significativa (95% de confianza); de éstas, el 12.5% (El Agrado y Santa Helena) tienen tendencia negativa, es decir, una disminución paulatina de la temperatura máxima media anual (Figura 13a), mientras que el resto

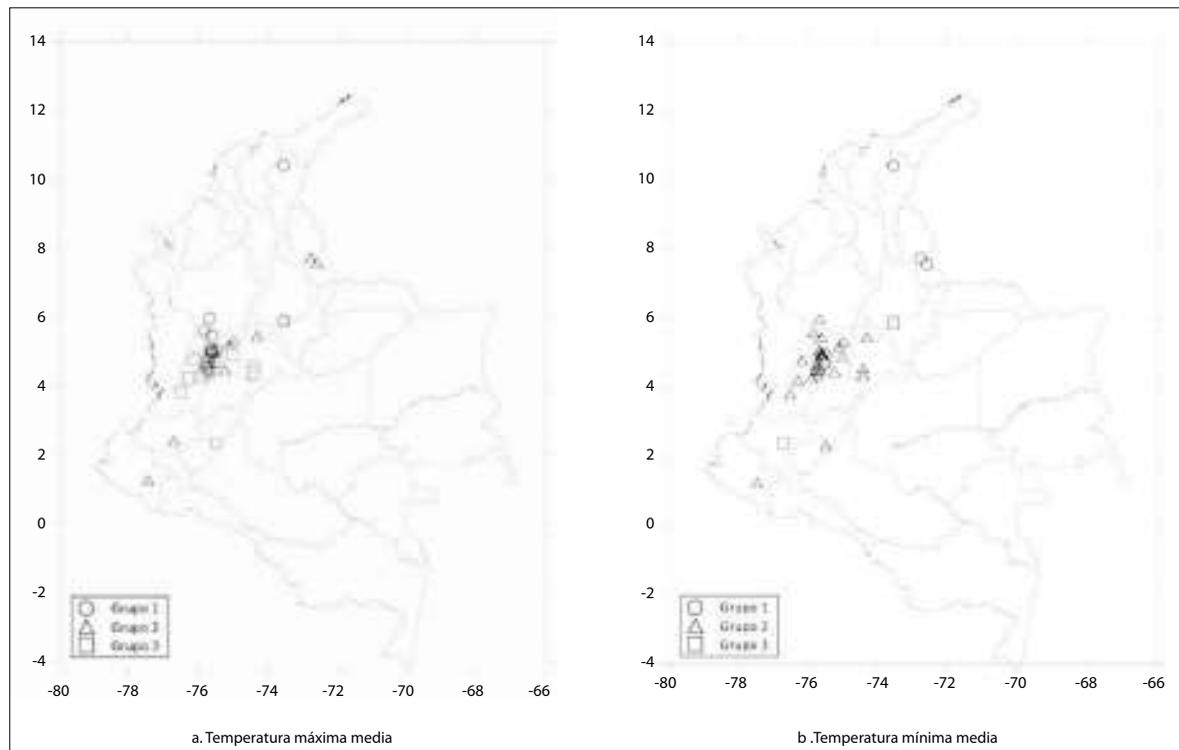


Figura 9. Grupos de comportamiento temporal de la temperatura del aire a través del año en la zona cafetera colombiana.

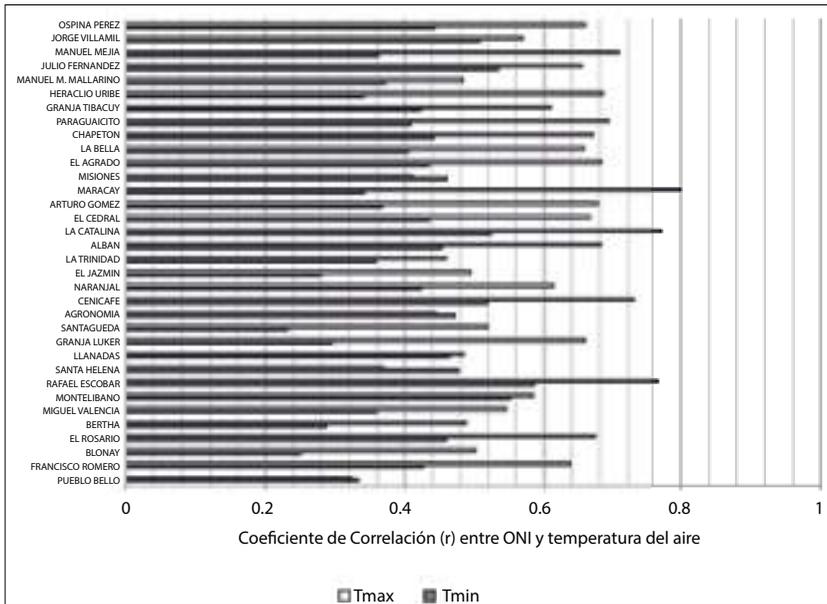


Figura 10. Relación entre las temperaturas máxima media y mínima media anual y el fenómeno ENOS, medido como el coeficiente de correlación entre el ONI y las temperaturas.

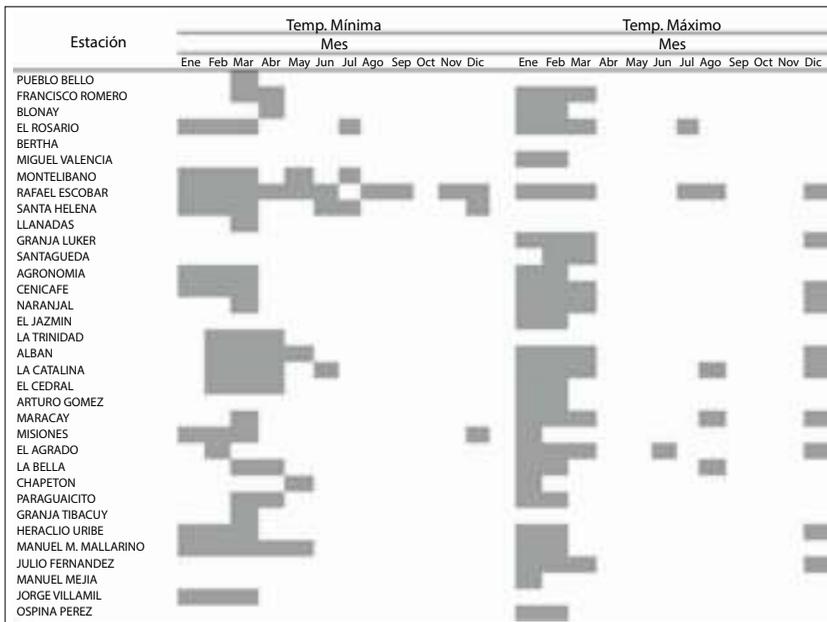


Figura 11. Meses más afectados por el fenómeno ENOS en cada una de las estaciones analizadas. El grado de afectación está definido por las correlaciones más altas entre ONI y cada una de las variables a escala mensual (superiores a 0.5 en el caso de la temperatura mínima y superiores a 0.7 en el caso de la temperatura máxima).

tiene tendencia positiva, es decir, un incremento paulatino de esta variable que hace que los últimos años tengan mayor temperatura máxima media en comparación con los anteriores (Figura 13b). En el 53% de las estaciones restantes no hay ningún tipo de tendencia (Figura 13c). La tendencia positiva más importante se encuentra en la Trinidad, donde el incremento de la temperatura máxima

media muestra un aumento de la misma de 0.4° C por cada diez años, mientras que la tendencia negativa más importante se encuentra en la estación Santa Helena donde la reducción de la temperatura máxima media tiene una tasa de cambio de -0.4° C por cada diez años.

El 84% de las estaciones analizadas tiene tendencia significativa en las series medias anuales

Tabla 3. Análisis de tendencia de Mann-Kendall de las series anuales de temperaturas del aire

Estación	Temperatura máxima		Temperatura mínima	
	p-valor	Tendencia (° C/año)	p-valor	Tendencia (° C /año)
Pueblo Bello	0.94	0.00	0.01+	0.01
Francisco Romero	0.21	0.01	0.00*	0.01
Blonay	0.24	0.01	0.00*	0.01
El Rosario	0.00*	0.02	0.00*	0.03
Bertha	0.00*	0.02	0.00*	0.03
Miguel Valencia	0.00*	0.02	0.00*	0.02
Montelibano	0.00*	0.03	0.00*	0.03
Rafael Escobar	0.32	0.03	1.00	0.00
Santa Helena	0.01+	-0.04	0.03+	0.02
Llanadas	0.79	-0.01	0.86	0.00
Granja Luker	0.04+	0.01	0.00*	0.03
Santagueda	0.74	0.00	0.00*	0.03
Agronomía	0.32	0.01	0.00*	0.02
Cenicafé	0.01+	0.01	0.00*	0.02
Naranjal	0.63	0.00	0.00*	0.03
El Jazmín	0.76	0.00	0.00*	0.03
La Trinidad	0.00*	0.04	0.00*	0.03
Alban	0.70	0.00	0.00*	0.02
La Catalina	0.21	0.02	0.34	0.01
El Cedral	0.00*	0.03	0.53	0.00
Arturo Gómez	0.00*	0.03	0.00*	0.03
Maracay	0.31	0.01	0.00*	0.02
Misiones	0.27	0.02	0.00*	0.04
El Agrado	0.04+	-0.04	0.04+	0.03
La Bella	0.27	0.01	0.00*	0.02
Chapeton	0.03+	0.03	0.05+	0.02
Praguaicito	0.85	0.00	0.00*	0.01
Granja Tibacuy	0.00*	0.02	0.01+	0.01
Heracio Uribe	0.27	0.01	0.01+	-0.02
Manuel M. Mallarino	0.18	0.01	0.75	0.00
Julio Fernandez	0.03+	0.01	0.00*	0.03
Manuel Mejía	0.28	0.01	0.00*	0.01
Jorge Villamil	0.00*	0.03	0.00*	0.01
Ospina Pérez	0.01+	0.01	0.00*	0.01

+ Tendencia significativa (95% de confianza) * Tendencia muy significativa (99% de confianza).

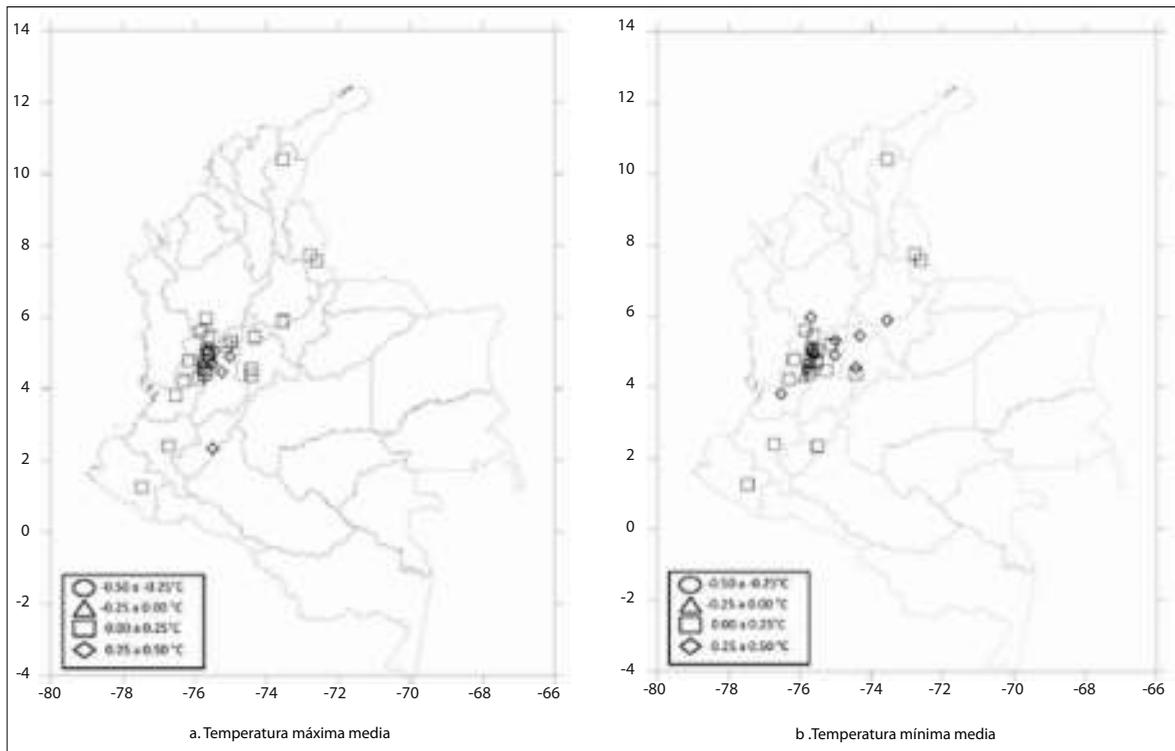


Figura 12. Tendencia de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana.

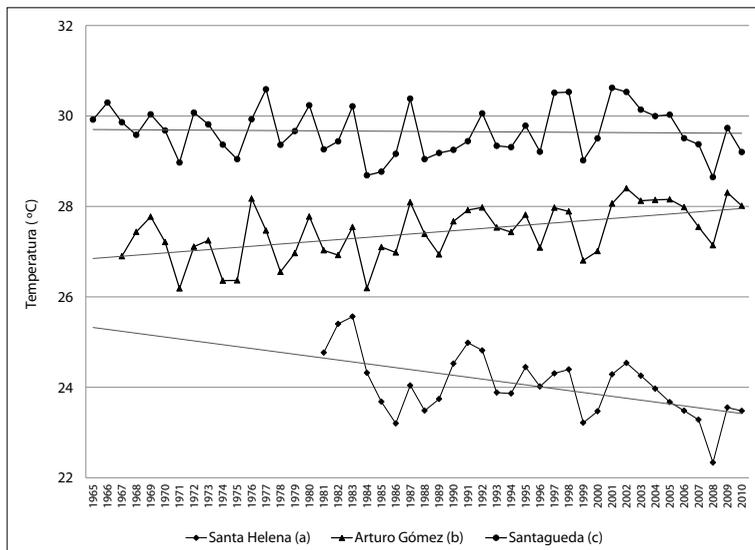


Figura 13. Ejemplo de los resultados obtenidos con el análisis de tendencia de la temperatura máxima media anual. La menor parte de las estaciones (2) se comportan como Santa Helena (a), 14 estaciones tienen un comportamiento como el de Arturo Gómez y la mayoría de estaciones (18) tienen un comportamiento como el de Santagueda (c).

de temperatura mínima (Tabla 3 y Figura 12 b). De todas esas estaciones, que en total son 28, solo una presenta tendencia negativa, que es la estación Heraclio Uribe (Figura 14a), el resto son tendencias positivas (Figura 14b), es decir, en la mayoría

de los sitios analizados la temperatura mínima se está incrementando (mañanadas más cálidas con respecto a los datos capturados en las décadas anteriores). En la estación Heraclio Uribe la tasa de reducción de la temperatura mínima es de -0.2°C

por cada diez años, mientras que la tendencia positiva más importante se encuentra en Misiones, donde el incremento de la temperatura mínima media anual es de 0.4°C por cada diez años. El 16% restante de las estaciones no tiene ningún tipo de tendencia en los valores de temperatura mínima (Figura 14c). La estación Heraclio Uribe registró datos de temperatura entre 1954 y 1991, por lo que la tendencia a principios de la década de 1990 era que cada año las madrugadas eran más frías.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Es un hecho indiscutible que el principal generador de variación en los datos de temperatura del aire en la zona cafetera es la altura sobre el nivel del mar. El principio físico que relaciona estas dos variables es bien conocido, de hecho fue estudiado por Boyle y Mariotte (uno en Inglaterra y otro en Francia) en el siglo XVIII, y fue utilizado por Francisco José de Caldas, a principios del siglo XIX, para construir su hipsómetro (Albis y Martínez, 2000), razón por la cual estos resultados sólo confirman empíricamente la condición de gas ideal que tiene el aire. Dicha relación fue aprovechada por Chaves y Jaramillo (1998) para sugerir una expresión de la temperatura

media como función de la altura sobre el nivel del mar (-0.0061°C por cada metro de ascenso en altura) en la región andina colombiana, la cual es un promedio de la expresión encontrada en este trabajo para la temperatura máxima media y la mínima media.

Otro modulador de la variación en los datos de temperatura del aire es la latitud; no obstante, es de anotar que la mayor variación se da en los datos de temperatura mínima media; de hecho, el modelo obtenido al analizar las 34 estaciones de la zona cafetera se ajusta a lo obtenido por Hijmans *et al.* (2005) en su modelo de interpolación de datos climáticos a alta resolución (Figura 15a), es decir, una disminución de los valores de este elemento (-0.214°C) por cada grado de latitud. Por el contrario, la temperatura máxima media, que en el análisis de los datos no tiene un efecto de la latitud tan marcado como en la mínima, difiere totalmente de lo propuesto por estos mismos autores (Figura 15b).

Esta relación entre altura y temperatura, mediada por la latitud, explica el hecho de que la zona cafetera colombiana tenga, dependiendo de la latitud, franjas altitudinales diferentes. Como el cultivo del café requiere, según la FAO (1994), temperaturas superiores a 14°C e inferiores a 28°C , esta condición

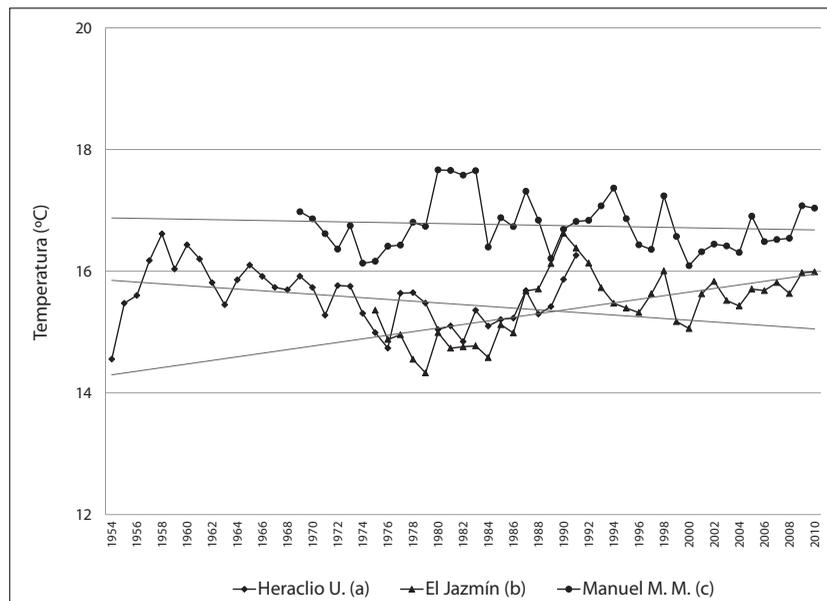


Figura 14. Ejemplo de los resultados obtenidos con el análisis de tendencia de la temperatura mínima media anual. La estación Heraclio Uribe es la única que tiene tendencia negativa (a), 27 estaciones tienen un comportamiento como el de Arturo Gómez (b), siendo el comportamiento más común y solo seis estaciones tienen un comportamiento como el de Manuel Mejía Mallarino (c).

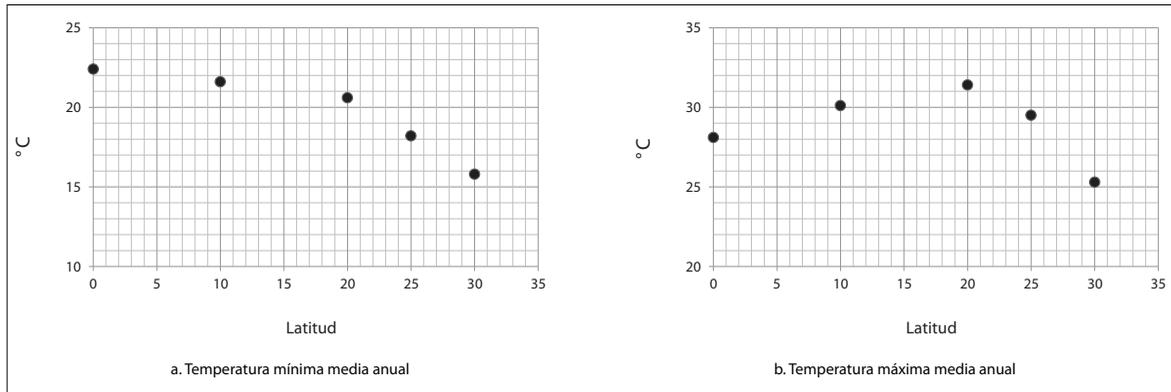


Figura 15. Temperatura mínima y máxima media anual del aire a la altura del nivel del mar en diferentes latitudes de la zona tropical.

se encuentra entre los 1 100 y 1 800 msnm a los 5° de latitud norte (Figura 16a), en el sur (cerca de la línea del ecuador, es decir la latitud cero) esta franja se encuentra entre los 1 150 y los 2 000 msnm (Figura 16b), mientras que en el norte (en la sierra nevada de Santa Marta), esta franja se encuentra entre los 950 y los 1 500 msnm (Figura 16c).

En la escala temporal es indiscutible el efecto del paso de la ZCIT sobre la temperatura máxima media mensual del aire; por ejemplo, en el caso de la estación Ospina Pérez (ubicada más al sur), así como en la estación Manuel Mejía (Cauca), como dicha banda nubosa se aleja más de estas localidades a mitad de año, la temporada seca de esta época (más fuerte que la que ocurre entre diciembre y febrero) trae consigo las más altas temperaturas máximas medias; sin embargo, se debe anotar que este comportamiento típico de las estaciones del sur de la zona cafetera también se presenta en estaciones ubicadas por encima de los 4° norte (Figura 7b). De otro lado están las estaciones ubicadas al norte, las cuales presentan mayores temperaturas máximas medias durante febrero y las menores en noviembre (Figura 7a); en este caso vale la pena anotar que la estación Pueblo Bello (la más norte de las estaciones analizadas), que tiene un cambio importante de la duración del día (Peña *et al.*, 2011) no tiene el comportamiento típico de las estaciones del norte, alejadas del ecuador, que generalmente presentan las mayores temperaturas entre los meses de junio y agosto, cuando el Sol está aparentemente sobre el hemisferio norte (Riehl, 1954). Como hecho

paradójico aparece el comportamiento de la temperatura máxima media en las estaciones del norte de Santander, que sí describen el comportamiento típico de una estación ubicada al norte (con las más altos valores de temperatura máxima media entre julio-agosto), como lo planteó este último autor. En el resto de estaciones, la mayoría ubicadas en el centro del país, que presentan dos picos de lluvia durante el año, las mayores temperaturas máximas medias aparecen cuando no hay lluvias (en ausencia de la ZCIT), como se observa en la Figura 7c, en las que se aprecia que generalmente los dos picos de temperatura máxima media se tienen en febrero y agosto.

En el caso de la temperatura mínima media lo más destacado es que con excepción de lo que ocurre en la estación ubicada más al norte (Pueblo Bello) la variación de este elemento climático a través del año es muy pequeña, mostrando que en zonas ecuatoriales la variación de éste está más asociado con el ciclo diario que con otro generador de variabilidad, como plantean Ramírez y Goyal (2008) y Peña *et al.* (2011). En la estación Pueblo Bello se cumple el comportamiento típico de la temperatura media en una estación tropical alejada del ecuador como plantea Riehl (1954), con los máximos a mitad de año.

En forma generalizada, ENOS tiene la capacidad de modificar los datos de temperatura a escala anual, de tal forma que la zona cafetera tiene aumento de las temperaturas (mínima y máxima) bajo condición El Niño y un descenso de los valores de

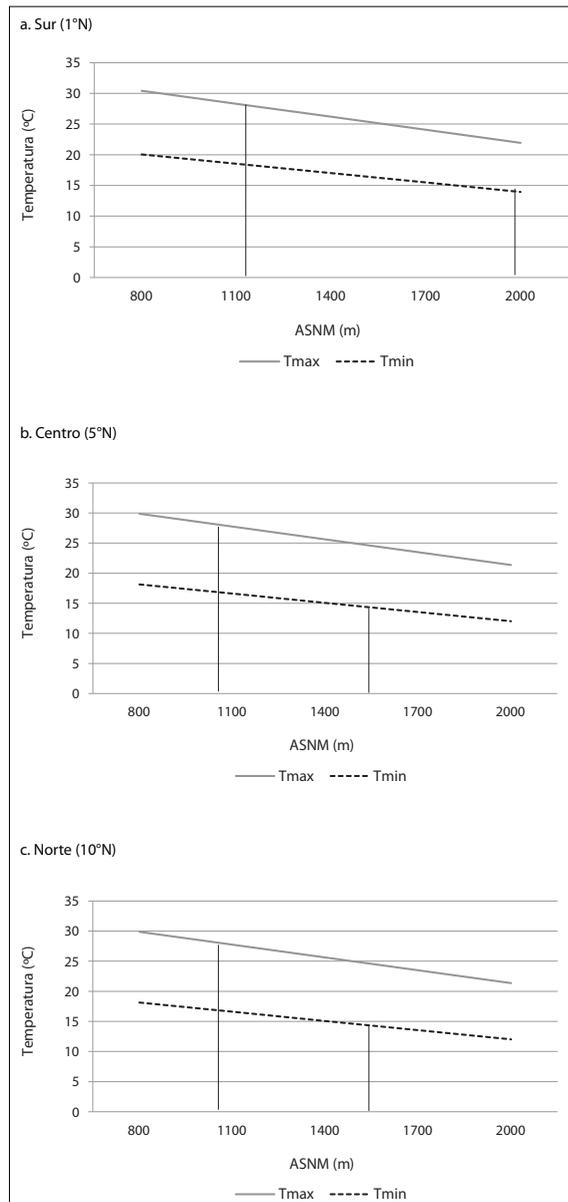


Figura 16. Cambios en la franja altitudinal apta para el cultivo del café como consecuencia del cambio en la latitud. Se utilizaron los datos del modelo obtenido en la Tabla 2.

estas variables bajo condición La Niña. El efecto de este fenómeno, que es más significativo sobre las temperaturas máximas que sobre las mínimas, es mayor en algunos meses del año, de tal forma que según lo consignado en las Figuras 10 y 11, la probabilidad de encontrar anomalías positivas (negativas) de temperatura máxima media duran-

te El Niño (La Niña) es mayor entre diciembre y marzo, mientras que la probabilidad de tener las más bajas (altas) temperaturas mínimas durante La Niña (El Niño) se da entre enero y mayo (primer semestre del año), tal como lo reportaron Peña *et al.* (2001) en condiciones del valle del río Cauca para estas mismas variables y Ramírez y Jaramillo (2009) para la precipitación en la zona cafetera. Vale la pena mencionar que la estación en la que en forma generalizada se tiene la menor relación entre ENOS y la temperatura del aire es Pueblo Bello, resultado similar al obtenido por Peña y Paternina (2010) en su análisis de la lluvia, mostrando que, en comparación con el centro y el sur, la zona cafetera del norte del país es menos afectada por El Niño y La Niña.

La temperatura mínima media anual ha mostrado incremento generalizado (en la gran mayoría de estaciones analizadas) y significativo de sus valores en los últimos años. Por el contrario, la temperatura máxima media tiene tendencias incrementales en menos de la mitad de las estaciones analizadas. Es de anotarse que en algunas estaciones se muestran tendencias negativas (enfriamiento) pero son muy pocas. Este comportamiento, en el que son las series de temperatura mínima las que tienen tendencias generalizadas positivas es muy diferente al comportamiento reportado por Peña *et al.* (2011) en el altiplano cundi-boyacense, donde el comportamiento general es el incremento de la temperatura máxima media anual.

El incremento de la temperatura mínima media en la mayoría de estaciones también podría estar asociado a un efecto, relacionado con la Oscilación Decadal del Pacífico –ODP– (Mantua y Hare, 2002), que ha permitido la predominancia de aguas superficiales más cálidas de lo normal sobre el Océano Pacífico Tropical durante los últimos años. En efecto, las temperaturas más bajas del agua superficial del océano Pacífico durante los últimos 60 años (en la zona 3.4) se presentaron al finalizar la fase fría de la ODP en la década comprendida entre 1967 y 1976 (Figura 17).

Asimismo, las menores temperaturas mínimas medias en la estación Agronomía se presentaron entre 1967 y 1972, en donde sobresalieron, por ser los años más fríos de la serie, 1968 y 1971, el

primero de los cuales fue en su mayoría dominado por la condición El Niño y 1971, que en su mayoría estuvo bajo condición La Niña, mostrando la escasa relación que hay entre este elemento del clima y el ENOS. Sin embargo, al acumular el ONI en la escala anual, índice que revela el comportamiento a largo plazo de la temperatura del agua superficial del Pacífico Tropical, se observa que la acumulación de éste tiene una relación fuerte con la temperatura

mínima media anual, como se observa en la Figura 18 y Tabla 4.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, que financió este trabajo a través del convenio 0255 de 2012 suscrito con la



Figura 17. Comportamiento del promedio quinquenal de la anomalía de la temperatura superficial del mar. Se aprecia la época con aguas más frías entre 1967 y 1976. El año representa el año final del lustro, de tal forma que 1954 representa el periodo 1950-1954.

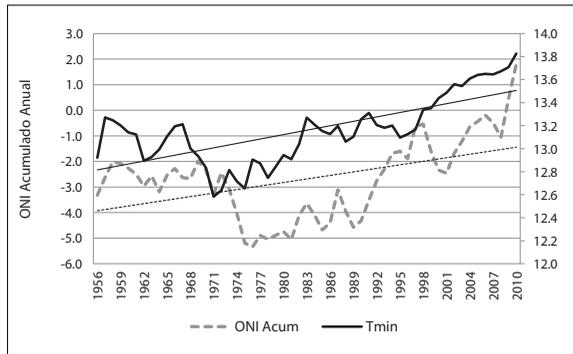


Figura 18. Relación de la temperatura mínima media mensual de la estación Agronomía con el ONI acumulado anual.

Tabla 4. Coeficiente de determinación obtenido al relacionar el ONI acumulado anual con los promedios de las temperaturas máximas y mínimas para las 34 estaciones analizadas

Estación	Coeficiente de determinación (R ²)		Estación	Coeficiente de determinación (R ²)	
	T. mínima	T. máxima		T. mínima	T. máxima
Agronomía	0.10	0.03	La Bella	0.17	0.09
Albán	0.54	0.06	La Catalina	0.00	0.10
Arturo Gómez	0.33	0.18	La Trinidad	0.55	0.32
Bertha	0.32	0.19	Llanadas	0.34	0.26
Blonay	0.16	0.04	Manuel M, Mallarino	0.00	0.13
Cenicafé	0.55	0.14	Manuel Mejía	0.34	0.12
Chapetón	0.00	0.11	Maracay	0.18	0.10
El Agrado	0.08	0.08	Miguel Valencia	0.37	0.45
El Cedral	0.07	0.33	Misiones	0.23	0.22
El Jazmín	0.19	0.00	Montelibano	0.48	0.25
El Rosario	0.53	0.20	Naranjal	0.32	0.01
Francisco Romero	0.14	0.09	Ospina Pérez	0.31	0.10
Granja Luker	0.38	0.17	Paraguacito	0.14	0.09
Granja Tibacuy	0.30	0.14	Pueblo Bello	0.22	0.00
Heraclio Uribe	0.03	0.00	Rafael Escobar	0.09	0.15
Jorge Villamil	0.35	0.26	Santa Helena	0.26	0.00
Julio Fernandez	0.56	0.06	Santagueda	0.30	0.08

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia / CENICAFÉ.

REFERENCIAS

- Albis, V. y R. Martínez (2000), “Las investigaciones meteorológicas de Caldas”, *Meteorología Colombiana*, núm. 2, pp. 131-140.
- Chaves, B. y A. Jaramillo (1998), “Regionalización de la temperatura del aire en Colombia”, *Avances en Recursos Hidráulicos*, núm. 6, pp. 37-42.
- DANE (2012), *Resultados Encuesta Nacional Agropecuaria 2011*, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Bogotá, Colombia.
- FAO (1994), *EcoCrop I. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database v 1.0*, AGLS, Roma.
- Gliessman, S. (2007), *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 59-71.
- Gregory, P. (1992), “Crecimiento y desarrollo vegetal”, en Wild, A. (ed.), *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, pp. 31-72.
- Grierson, W. (1995), “Role of temperature in the physiology of crop plants: pre and postharvest”, in Pessarakli, M. (ed.), *Handbook of plant and crop physiology*, Dekker Publisher, Nueva York, pp. 61-81.
- Hamed, K. H. (2008), “Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis”, *Journal of Hydrology*, no. 349, pp. 350-363.
- Hijmans, R., S. Cameron, J. Parra, P. Jones and A. Jarvis (2005), “Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas”, *International Journal of Climatology*, no. 25, pp. 1965-1978.
- Jaramillo, A. y G. Valencia (1980), “Los elementos climáticos y el desarrollo de *Coffea arabica* L. en Chinchiná, Colombia”, *Revista Cenicafe*, vol. 31, núm. 4, pp. 127-144.
- Jaramillo, A. y O. Guzmán (1984), “Relación entre la temperatura y el crecimiento en *Coffea arabica* L., variedad Caturra”, *Revista Cenicafe*, vol. 35, núm. 3, pp. 57-65.
- León, G., J. Zea y J. Eslava (2000), “Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia”, *Meteorología Colombiana*, núm. 1, pp. 31-38.
- López, F., J. Naranjo, M. Villegas y G. Valencia (1972), “Influencia de la altitud en el desarrollo de plántulas de café en almacigo”, *Revista Cenicafe*, vol. 23, núm. 4, pp. 87-97.
- Mantua, N. and S. Hare (2002), “The Pacific Decadal Oscillation”, *Journal of Oceanography*, no. 58, pp. 35-44.
- Onoz, B. and M. Bayazit (2003), “The power of statistical tests for trend detection”, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, no. 27, pp. 247-251.
- Pabón, J., J. Eslava y R. Gómez (2001), “Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia”, *Meteorología Colombiana*, núm. 4, pp. 47-59.
- Peña, A., B. Arce, F. Boshell, M. Paternina, M. Ayarza and E. Rojas (2011), “Trend analysis to determine hazards related to climate change in the Andean agriculture of Cundinamarca and Boyacá”, *Agronomía Colombiana*, vol. 29, no. 2, pp. 275-285.
- Peña, A., E. Cortés y F. Montealegre (2001), “Incidencia de los fenómenos “El Niño” y “La Niña” sobre las condiciones climáticas en el valle del río Cauca, Parte I: Análisis climatológico”, *Meteorología Colombiana*, núm. 3, pp. 103-118.
- Peña, A., J. Valencia y C. Ramírez (2014), “Caracterización del efecto de “El Niño” y “La Niña” sobre la lluvia de la zona cafetera colombiana”, *Revista Luna Azul*, núm. 39, pp. 89-104.
- Peña, A. y M. Paternina (2010), “Señales de variabilidad y cambio en algunas series anuales de precipitación de la zona cafetera colombiana”, *Revista Cenicafe*, vol. 61, núm. 2, pp. 174-187.
- Peña, A., V. Ramírez, A. Jaramillo, R. Rendón and J. Arcila (2011), “Effects of Daylength and Soil Humidity on the Flowering of Coffee *Coffea arabica* L. in Colombia”, *Revista Facultad Nacional de Agronomía – Medellín*, vol. 64, no. 1, pp. 5745-5754.
- Peña, A., V. Ramírez, J. Valencia y A. Jaramillo (2012), *La lluvia como factor de amenaza para el cultivo del café en Colombia*, Avances Técnicos Cenicafe.
- Ramírez, V. y A. Jaramillo (2009), “Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia”, *Revista Cenicafe*, vol. 60, núm. 2, pp. 161-172.
- Ramírez, V. y M. Goyal (2008), *Elementos de Agroclimatología*, Editorial Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal – UNISARC.
- Riehl, H. (1954), *Tropical Meteorology*, McGraw-Hill Book Company, Inc. Nueva York.
- Rojas, E., B. Arce, A. Peña, F. Boshell y M. Ayarza (2010), “Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas altoandinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia)”, *Revista Corpoica*, vol. 11, núm. 2, pp. 173-182.