

FLORACIÓN DEL CAFÉ EN COLOMBIA Y SU RELACIÓN CON LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA, TÉRMICA Y DE BRILLO SOLAR

Víctor H. Ramírez B.*; Jaime Arcila P.*; Álvaro Jaramillo R.**; José R. Rendón-S.****; Guiovanny Cuesta G.***; Hernán D. Menza F.***; Carlos G. Mejía M.***; Diego F. Montoya***; Jhon W. Mejía M.***; Jorge C. Torres N.***; Pedro M. Sánchez A.***; José E. Baute B.***; Andrés J. Peña Q.**

RESUMEN

RAMÍREZ B., V.H.; ARCILA P.,J.; JARAMILLO R., A.; RENDÓN S., J.R.; CUESTA G.,G.; MENZA F., H.D.; MEJÍA M., C.G.; MONTOYA, D.F.; MEJÍA M., J.W.; TORRES N., J.C.; SÁNCHEZ A., P.M.; BAUTE B., J.E.; PEÑA Q., A.J. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé* 61 (2):132-158.2010

La floración del café es una respuesta fenológica asociada a cambios en variables agrometeorológicas como la disponibilidad hídrica en el suelo, la temperatura del aire y el brillo solar, en Colombia por la presencia de las cordilleras existe una amplia variación de estos factores. El objetivo del trabajo fue desarrollar una herramienta agrometeorológica que permita cuantificar el efecto de la variabilidad climática en Colombia sobre la floración del café. Se realizó un análisis trimestral de registros semanales de botones florales cuantificados durante los años 2008, 2009 y 2010 en diferentes localidades de la zona cafetera Colombiana. Los resultados muestran que el número de botones florales se relaciona con los cambios de humedad del suelo, el tiempo térmico, cambios diarios de temperatura del aire y el brillo solar. Se proponen unos índices denominados hidrotérmicos e hidroheliotérmicos los cuales permiten estimar el efecto de la variabilidad climática sobre la floración del café en Colombia. .

Palabras clave: Índices agrometeorológicos, crecimiento, desarrollo, tiempo térmico, amplitud térmica.

ABSTRACT

Coffee crop flowering is a phenological response associated with agrometeorological variables such as soil moisture changes, air temperature and sun light. In Colombia there exists a wide variation of these factors due to the presence of mountain chains. The objective of this work was to develop an agrometeorological tool that allows quantifying the effect of climatic variability on the coffee flowering in Colombia. We conducted a trimonthly analysis of flower buds records measured weekly during three years (2008-2009 and 2010) in different localities of the Colombian coffee zone. The results indicate that the number of coffee flower buds is related with soil moisture changes, thermic conditions, daily air temperature changes and sun light. We propose some indices called hydrothermal or hydroheliothermal which allow estimating the effect of climatic variability on coffee flowering in Colombia.

Keywords: Agrometeorological indices, growth, development, thermic conditions, thermal amplitude.

* Investigador Científico I e Investigador Principal, respectivamente. Fitotecnia. Cenicafé

** Investigador Científico III e Investigador Científico I, respectivamente. Agroclimatología. Cenicafé

*** Asistente de Investigación. Experimentación. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

La floración del café es una respuesta fenológica que incide directamente en la producción del cultivo, por lo tanto es necesario comprender e identificar los factores y variables que limitan o favorecen dicho fenómeno. Poder entender el fenómeno de floración y establecer una relación con las variables agrometeorológicas es de gran utilidad, dado que se podrá cuantificar el efecto de la variabilidad climática sobre el cultivo y avanzar en la estimación de los efectos potenciales sobre la producción.

La floración del café está estrechamente ligada a factores climáticos como: el fotoperíodo, la distribución de los períodos húmedos y secos, y cambios en la temperatura del aire (1, 5, 9, 12, 14, 16, 18, 27, 35, 24, 36). En Brasil se ha explicado el fenómeno de floración y llenado de frutos a partir del desarrollo e implementación de modelos basados en variables agrometeorológicas (26, 37).

Trojer (35) reportó que durante el período de aparición de botones florales y crecimiento de ramas (más o menos dos meses antes de la antesis floral), predominan las condiciones de tiempo seco, buena radiación, altas temperaturas y grandes oscilaciones diarias, y durante el período de antesis, predomina el tiempo variable, y las temperaturas mínimas nocturnas bajan hasta sus mínimos absolutos pero no define valores críticos, que permita definir que es bueno ó que es alto. Pero es éste unos de los primeros reportes en los cuales se relacionan observaciones de campo de la floración con elementos del clima en Colombia. Posteriormente, Arcila y Jaramillo (4) afirman que déficit hídricos fuertes concentran la floración y que los déficit hídricos moderados las dispersan; mas recientemente, Camayo et al. (9) desarrollaron modelos que relacionan las etapas de floración con variables agroclimáticas para una localidad de la zona cafetera del centro-occidente colombiano (Estación Central Naranjal).

Los objetivos del presente trabajo fueron: i) cuantificar la relación entre variables agrometeorológicas y la floración del café en Colombia y ii) desarrollar una metodología basada en índices que permitieran cuantificar el efecto de la variabilidad climática sobre la floración del café en Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de la floración se realizó en siete estaciones experimentales del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé (Tabla 1), ubicadas desde 02° 24' de latitud Norte (El Tambo, Cauca) hasta los 07° 06' (Floridablanca, Santander).

Desde mayo de 2008 hasta abril de 2010, en cada una de las estaciones experimentales se realizó semanalmente un contero del número de botones florales correspondiente a la etapa 59 (preantesis) en la escala BBCH (Figura 1) aplicada por Arcila *et al.* (3) para café. Los conteos se realizaron en lotes comerciales sembrados con la Variedad Castillo® general y Regionales, a libre exposición solar, excepto el lote de Santander, el cual estaba bajo sombrío (35%). La densidad varió entre 4.444 y 10.000 sitios/ha, equivalente a 8.888 y 10.000 tallos/ha (Tabla 2).

Períodos analizados. En Colombia se presentan dos períodos de floración, comprendidos entre el 1° de mayo al 31 octubre y entre el 1° de noviembre al 30 de abril (2). Cada período de floración se dividió en dos trimestres. Para correlacionar la floración con los índices, se tomaron los valores de los índices de 20 días antes del inicio de cada trimestre de floración (Tabla 3). Los períodos analizados tuvieron la ocurrencia de eventos de El Niño y La Niña. El evento de El Niño inició en el mes de junio de 2009 y finalizó en el mes de abril de 2010, y el evento La Niña inició en septiembre de 2007 y se extendió

Tabla 1. Localización de las estaciones experimentales en donde se desarrolló el estudio en Colombia.

Estación	Departamento	Municipio	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m)
Cordillera Central - vertiente Occidental					
Naranjal	Caldas	Chinchiná	04°58'	75°39'	1.381
El Rosario	Antioquia	Venecia	05°58'	75°42'	1.635
La Catalina	Risaralda	Pereira	04°45'	75°44'	1.321
Paraguaicito	Quindío	Buenavista	04°24'	75°44'	1.203
El Tambo	Cauca	El Tambo	02°24'	76°44'	1.735
Cordillera Central - vertiente Oriental					
La Trinidad	Tolima	Libano	04°54'	75°02'	1.456
Cordillera Oriental - vertiente Occidental					
Santander	Santander	Floridablanca	07°06'	73°04'	1.539

hasta mayo de 2008, lo que permitió evaluar en detalle el efecto del déficit y el exceso hídrico sobre la floración del café.

Evaluación de la disponibilidad hídrica, térmica y energética. La disponibilidad hídrica se evaluó empleando los índices de déficit hídrico (IDH) y de humedad del suelo (IHS) propuestos por Ramírez *et al.* (29). El IDH se emplea para cuantificar el déficit hídrico y el IHS se utiliza para

cuantificar tanto el déficit como el exceso hídrico. Para el cálculo de estos índices se consideró información meteorológica a nivel diaria, registrada en las estaciones meteorológicas ubicadas en cada una de las estaciones experimentales en donde se registró la floración, la información meteorológica empleada fue: lluvia, temperaturas media, máxima, mínima y brillo solar, para cada uno de los trimestres que se describen en la **Tabla 3**.

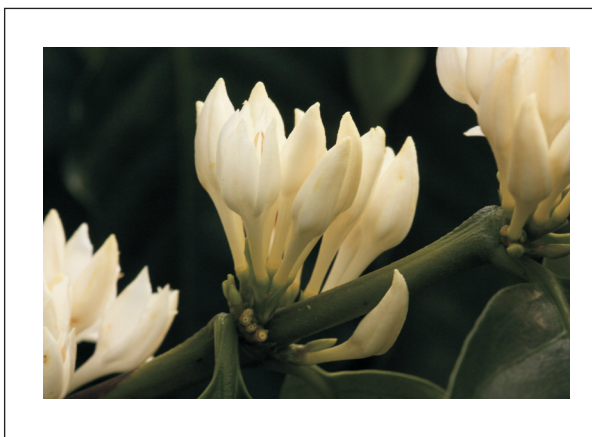


Figura 1. Botones florales en estado de preantesis, en Etapa 59 escala BBCH.

Tabla 2. Características de los lotes en las estaciones experimentales donde se hizo el conteo de botones florales.

Semestre	Estación	Variedad	Edad (meses)	Densidad (sitios/ha)	Tallos por sitio
AAño 2008	Naranjal	Castillo Naranjal	23	4.444	2
	La Catalina	Colombia	30	5.000	2
	Paraguaicito	Castillo	24	5.000	2
	Líbano	Castillo	36	5.000	2
	El Tambo	Castillo	39	6.666	1
	El Rosario	Castillo	38	10.000	1
	Santander	Castillo	42	5.000	2
BAño 2008	Naranjal	Castillo Naranjal	29	4.444	2
	La Catalina	Colombia	36	5.000	2
	Paraguaicito	Castillo	30	5.000	2
	Líbano	Castillo	42	5.000	2
	El Tambo	Colombia	36	5.000	2
	El Rosario	Castillo	33	10.000	1
	Santander	Castillo	48	5.000	2
AAño 2009	Naranjal	Castillo Naranjal	22	4.444	2
	La Catalina	Colombia	42	5.000	2
	Paraguaicito	Castillo	30	5.917	1
	Líbano	Castillo	48	5.000	2
	El Tambo	Colombia	48	6.666	1
	El Rosario	Castillo	39	10.000	1
	Santander	Castillo	54	5.000	2
BAño 2009	Naranjal	Castillo Naranjal	28	4.444	2
	La Catalina	Colombia	48	5.000	2
	Paraguaicito	Castillo Paraguaicito	36	5.917	1
	Líbano	Castillo	31	5.000	2
	El Tambo	Colombia	54	6.666	1
	El Rosario	Castillo	45	1.000	1
	Santander	Castillo	48	5.000	2
AAño 2010	Naranjal	Castillo Naranjal	34	4.444	2
	La Catalina	Castillo Rosario	25	5.000	2
	Paraguaicito	Castillo Paraguaicito	43	5.917	1
	Líbano	Castillo	36	5.000	2
	El Tambo	Castillo El Tambo	30	5.208	2
	El Rosario	Castillo	51	10.000	1
	Santander	Castillo	53	5.000	2

Para el cálculo de los índices hídricos (IDH e IHS), se consideraron las siguientes variables: coeficiente de cultivo (K_c) de 1,05 y profundidad de raíces de 40 cm. En la **Tabla 4** se presentan las propiedades hidrofísicas del suelo de cada una de las estaciones experimentales donde se desarrolló el estudio.

La disponibilidad térmica se evaluó empleando dos índices. El primero fue el tiempo térmico (TT), dado que los organismos requieren para su crecimiento y desarrollo una cantidad constante de calor (19), la cual se expresa comúnmente como tiempo térmico o grados día de desarrollo. El TT se acumuló para cada trimestre desde los 20

días antes del inicio de cada trimestre de floración (**Tabla 3**), y se estimó de acuerdo con la **Ecuación** <<1>>:

$$T.T = \sum_1^{110} [T_{med} - T_b] \quad \text{<<1>>}$$

Donde

T_{med} : temperatura media diaria estimada como la suma de la temperatura de las lecturas de temperatura de las 07:00, 13:00 y 2 veces las 19:00 horas dividido entre cuatro,

T^b : temperatura base (10°C).

Tabla 3. Trimestres de floración considerados en el estudio de la floración del café y trimestres climáticos respectivos.

Período	Trimestre observado de floración	Trimestre observado de los índices	Año
I	Del 1° de may. al 31 de jul.	Del 20 de abr. al 31 de jul.	2008
	Del 1° de ago. al 31 de oct.	Del 20 de jul. al 31 de oct.	2008
II	Del 1° de nov. al 31 de ene.	Del 20 de oct. al 31 de ene.	2008 -2009
	Del 1° de feb. al 30 de abr.	Del 20 de ene. al 30 de abr.	2009
III	Del 1° de may. al 31 de jul.	Del 20 de abr. al 31 de julio	2009
	Del 1° de ago. al 31 de oct.	Del 20 de jul. al 31 de oct.	2009
IV	Del 1° de nov. al 31 de ene.	Del 20 de oct. al 31 de ene.	2009-2010
	Del 1° de feb. al 30 de abr.	Del 20 de ene. al 30 de abr.	2010

Tabla 4. Características hidrofísicas de los suelos de cada una de las estaciones experimentales incluidas en el estudio (33).

Estación	CC (%)	PMP (%)	Porosidad (%)	Densidad aparente (g.cm ⁻³)
Naranjal	80,0	49,0	67,6	0,70
La Catalina	61,7	44,0	66,7	0,70
La Trinidad	77,4	46,5	75,5	0,55
El Tambo	58,0	46,0	73,7	0,50
Paraguacito	22,0	11,0	64,0	0,90
Santander	22,0	11,0	64,0	0,90

CC= Humedad gravimétrica del suelo(%) a capacidad de campo (-33kPa); PMP= humedad gravimétrica del suelo a punto de marchitez permanente (%) (-1.500kPa).

En las zonas tropicales los cambios estacionales de temperatura no son tan pronunciados, como sí lo son los cambios a nivel diario (19), por lo tanto el segundo índice térmico empleado fue la amplitud térmica (AT), el cual se estimó como la diferencia entre la temperatura máxima (T_{\max}) y la temperatura mínima (T_{\min}) a nivel diario (Ecuación <<2>>). La AT varía con las condiciones de radiación solar que se presenten en cada zona (19).

$$AT = [T_{\max} - T_{\min}] \quad \ll 2 \gg$$

La disponibilidad energética se evaluó empleando el índice de déficit de brillo solar (IDBS), el cual se determinó como la diferencia entre el brillo solar astronómico posible (N) y el brillo solar observado (n) medido en el heliógrafo (Ecuación <<3>>).

$$IDBS = [N - n] \quad \ll 3 \gg$$

El brillo solar astronómico posible (N) para cada región está en función de la latitud y de la época del año y se estima de acuerdo con la Ecuación <<4>>:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega s \quad \ll 4 \gg$$

Donde

ωs : Ángulo de la puesta del sol (radianes)

El ángulo de la puesta del sol se calcula de acuerdo con las Ecuaciones <<5>> y <<6>>:

$$\bar{\omega} s = \ar \cos [- \tan (\varphi) \tan(\delta)] \quad \ll 5 \gg$$

Donde

φ : latitud (radianes)

δ : declinación solar (radianes).

$$\delta = 0,409 \text{ Sen } \left[\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right] \quad \ll 6 \gg$$

Donde

J: número del día del año (1 a 365).

Análisis de los datos. Se emplearon modelos de regresión para evaluar la relación entre cada uno de los índices (predictores-K) y el número de botones florales por localidad, por trimestre y por zona. Se seleccionaron las variables de regresión o predictoras (K) que mejor explicaban la relación índices-floración a partir de los coeficientes de determinación múltiples (R^2), una vez identificada la relación entre las variables, se definieron unos índices que permitieran explicar la relación entre el número de botones florales y la disponibilidad hídrica, térmica y energética.

RESULTADOS

Distribución de la floración. Los mayores porcentajes de la floración anual en el trimestre febrero-marzo-abril se registraron para La Estación El Rosario con 53,5%, Santander con 48,3%, Paraguaicito con 45,3%, Naranjal con 44,7% y para La Catalina con 38,9%. En las Estaciones El Tambo y La Trinidad se registraron los mayores porcentajes de floración en el trimestre agosto-septiembre-octubre, con valores promedio de 38,8% para El Tambo y 33,0% para La Trinidad (Figura 2), y valores muy bajos para las estaciones El Rosario (10,2%) y Santander (10,3%), contrario a lo observado en Paraguaicito, donde fue el segundo trimestre en importancia con 30,45% de la floración anual. Para las

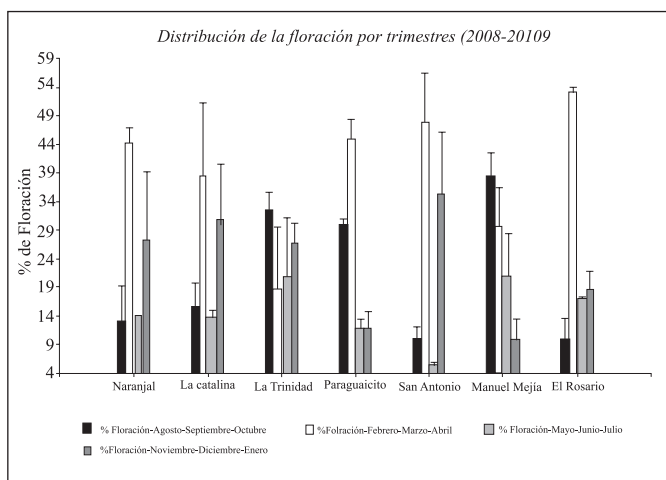


Figura 2. Distribución por trimestre de la floración del café en cada una de las estaciones experimentales durante el periodo de estudio (2008-2010). Las líneas sobre las barras, representan el error estándar ($p < 0,05$).

estaciones Naranjal, La Catalina, El Rosario, La Trinidad y Santander, el trimestre en el cual ocurrió la segunda floración de importancia fue en el trimestre de noviembre-diciembre-enero con valores de 27,7%, 31,2%, 18,9%, 27,7% y 35,6%, respectivamente. El trimestre mayo-junio-julio corresponde a la tercera floración en importancia para las estaciones El Tambo, La Trinidad y El Rosario, con valores promedio de 15,0% a 20,0%.

Al observar la distribución de la floración, se pueden identificar diferentes patrones de floración, como son: Zonas donde el mayor porcentaje de floración se registra en el trimestre febrero-marzo-abril y corresponde a las estaciones Naranjal, La Catalina, Santander y El Rosario; zonas donde el mayor porcentaje de floración se presenta en el trimestre agosto-septiembre-octubre y corresponde a las estaciones El Tambo y La Trinidad, y zonas donde el mayor porcentaje de floración se observa en el trimestre febrero-marzo-abril, pero con un alto porcentaje de floración en el trimestre agosto-septiembre-octubre, como lo es la estación Paraguaicito. En adelante, a los patrones de floración se denominarán como: zona centro en donde los mayores porcentajes

de floración se observan en el trimestre febrero-marzo-abril; zona sur en donde los mayores porcentajes de floración se presentan en los trimestres agosto-septiembre-octubre; y zona centro-sur en donde la floración se reparte en ambos trimestres. Se destacan zonas como la de La Trinidad, que está ubicada latitudinalmente en la zona centro (Tabla 1), pero tiene patrón de floración típico de zona sur, y la zona de Santander, que está ubicada latitudinalmente en la zona Norte, pero tiene patrón de floración de la zona centro.

Déficit hídrico y floración. Existe una relación directa entre el número de botones florales y el déficit hídrico (Tabla 5), las estaciones que mejor responden al déficit hídrico son El Rosario, Naranjal, La Trinidad y El Tambo. Las tres primeras responden tanto al déficit hídrico moderado como a déficit hídrico fuerte, mientras que la estación El Tambo solo responde a déficit hídrico fuerte. Cuando el déficit hídrico fue moderado (número de días con $IDH < 0,8$ /trimestre), en El Rosario por cada día con $IDH < 0,8$ hubo un incremento a 146 botones florales/30 plantas (5 botones florales por planta), mientras que en Naranjal se incrementó a 122 (4 botones florales por

Tabla 5. Relación entre el número de botones florales (NBF) y el número de días con el déficit hídrico en café (NIDH) .

Estación	Modelo	Significancia
Número de días con IDH <0,8 (Déficit moderado)		
El Rosario	NBF [£] =146,36 NIDH [±] (R ² =0,63)	*
La Catalina	NBF =43,53 NIDH (R ² =0,10)	
La Trinidad	NBF =53,63 NIDH (R ² =0,64)	*
El Tambo	NBF =55,80 NIDH (R ² =0,20)	
Naranjal	NBF =122,13 NIDH (R ² =0,50)	*
Paraguaicito	NBF =86,70 NIDH (R ² =0,11)	
Santander	NBF =229,65 NIDH (R ² =0,18)	
Número de días con IDH <0,5 (Déficit fuerte)		
El Rosario	NBF =181,36 NIDH (R ² =0,67)	*
La Catalina	NBF =44,78 NIDH (R ² =0,14)	
La Trinidad	NBF =40,67 NIDH (R ² =0,73)	**
El Tambo	NBF =57,78 NIDH (R ² =0,31)	
Naranjal	NBF =454,7 NIDH (R ² =0,67)	*
Paraguaicito	NBF =97,37 NIDH (R ² =0,25)	
Santander	NBF =102,2 NIDH (R ² =0,12)	
Número de días con IDH <0,3 (Déficit muy fuerte)		
El Rosario	NBF =297,0 NIDH (R ² =0,77)	**
La Catalina	NBF =65,77 NIDH (R ² =0,11)	
La Trinidad	NBF =53,49 NIDH (R ² =0,70)	**
El Tambo	NBF =93,40 NIDH (R ² =0,48)	
Naranjal	NBF =2545,89 NIDH (R ² =0,73)	**
Paraguaicito	NBF =113,61 NIDH (R ² =0,46)	
Santander	NBF =73,82 NIDH (R ² =0,18)	
Número de días con IHS <0,3 (Déficit muy fuerte)		
El Rosario	NBF=109,54 NIHS [†] (R ² =0,79)	**
La Catalina	NBF =29,23 NIHS (R ² =0,24)	
La Trinidad	NBF =34,66 NIHS (R ² =0,87)	**
El Tambo	NBF =27,90 NIHS (R ² =0,14)	
Naranjal	NBF =178,66 NIHS (R ² =0,73)	**
Santander	NBF =-1711 NIHS (R ² =0,38)	

*= p<0,05; **p<0,01. ± Número de días con índice de déficit hídrico inferior a 0,8; 0,5 y 0,3. Número de días con índice de humedad del suelo inferior a 0,3. £ Número de botones florales de 30 plantas por trimestre.

planta) y en La Trinidad se incrementó a 53 (2 botones florales por planta). Cuando el déficit hídrico se hizo más fuerte (número de días con $IDH < 0,3$ /trimestre), la relación fue más significativa ($P < 0,01$), y en la Estación Central Naranjal las plantaciones respondieron mejor que en la Estación El Rosario, con 2.546 botones florales/30 plantas, por cada día con $IDH < 0,3$ (85 botones florales por planta), mientras que en El Rosario sólo incrementó a 297 botones florales/30 plantas (10 botones florales por planta) (Tabla 5).

Las estaciones La Catalina, Paraguaicito y Santander no muestran una relación significativa entre el déficit hídrico y el número de botones florales, lo que hace pensar que además del déficit hídrico existe otro estímulo ambiental que influye sobre la floración del cultivo de café en las localidades.

Exceso hídrico y floración. Se observó una relación negativa entre el número de botones florales y el exceso hídrico. Igual que en el déficit hídrico, la respuesta no es igual para cada una de las localidades, siendo las estaciones experimentales Naranjal y El Rosario las que presentaron mayor reducción en el número de botones florales, a una tasa de 105 botones florales/30 plantas por cada día con $IHS > 0,5$ en Naranjal, y 86 botones

florales/30 plantas por cada día con $IHS > 0,5$ en El Rosario (Tabla 6). Las estaciones La Catalina y La Trinidad mostraron una tendencia similar, pero el modelo no fue estadísticamente significativo, por lo que se analizó bajo un modelo polinomial de segundo orden (Figura 3), lo cual indica que La Trinidad es más susceptible al déficit hídrico que La Catalina, debido a que en La Trinidad el café alcanzaría su máxima reducción en el número de botones florales a los 46 días con $IHS > 0,5$ /trimestre, mientras que La Catalina la planta alcanza su máxima reducción a los 85 días con $IHS > 0,5$ /trimestre.

Las estaciones Paraguaicito, Santander y El Tambo no presentaron días con exceso hídrico crítico para el cultivo.

Relación entre floración y temperatura. Se registró una relación directa entre el número de botones florales y el tiempo térmico acumulado por trimestre; las estaciones experimentales El Rosario y La Trinidad presentaron una relación significativa $p < 0,05$ y $p < 0,01$, respectivamente (Tabla 7). En la estación El Rosario, por cada grado de temperatura que acumula el café, se producen 40 botones florales/30 plantas, mientras que en La Trinidad se produce 25 botones/30 plantas.

Tabla 6. Relación entre el número de botones florales en café y el exceso hídrico en condiciones de un $IHS > 0,5$ (exceso hídrico crítico).

Estación	Modelo	Significancia
Número de días con $\pm IHS > 0,5$ (Exceso hídrico crítico)		
El Rosario	$NBF^{\text{£}} = -85,80 \text{ NIHS}^{\text{§}} (R^2=0,54)$	*
La Catalina	$NBF = -30,61 \text{ NIHS} (R^2=0,23)$	
La Trinidad	$NBF = -39,02 \text{ NIHS} (R^2=0,40)$	
Naranjal	$NBF = -105,3 \text{ NIHS} (R^2=0,76)$	**

*= $p < 0,05$; ** $p < 0,01$. \pm IHS= índice de Humedad del suelo. £ Número de botones florales de treinta plantas por trimestre. § Número de días con índice de humedad del suelo superior a 0,5 por trimestre.

Figura 3.
Relación entre el exceso hídrico y el número de botones florales en café por trimestre, en las estaciones experimentales La Catalina (Pereira, Risaralda) y La Trinidad (Libano, Tolima).

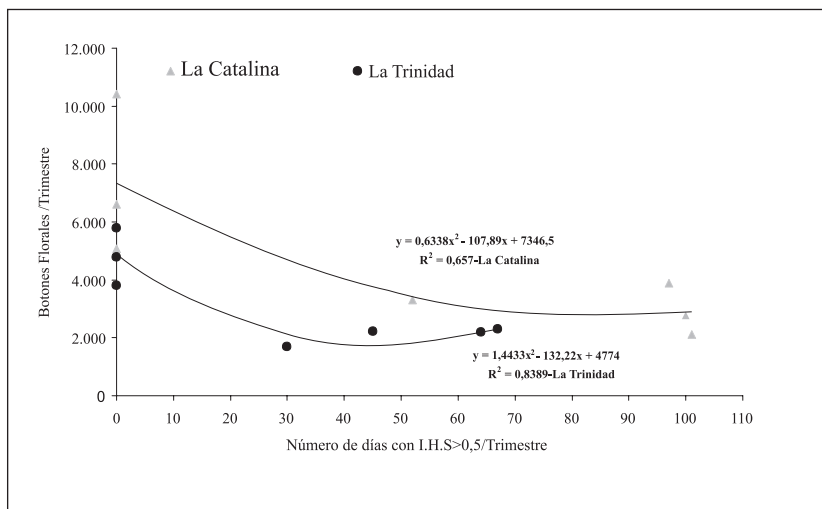


Tabla 7. Relación entre el número de botones florales con el tiempo térmico acumulado (TT).

Estación	Modelo	Significancia
El Rosario	$NBF^{\text{£}} = 40,21 TT^{\pm}$ ($R^2 = 0,46$)	*
La Catalina	$NBF = 20,43 TT$ ($R^2 = 0,10$)	
La Trinidad	$NBF = 24,69 TT$ ($R^2 = 0,83$)	**
El Tambo	$NBF = 14,38 TT$ ($R^2 = 0,12$)	
Naranjal	$NBF = 52,41 TT$ ($R^2 = 0,44$)	
Paraguaicito	$NBF = 40,76 TT$ ($R^2 = 0,36$)	
Santander	$NBF = 27,18 TT$ ($R^2 = 0,21$)	

*= $p < 0,05$; **= $p < 0,01$. £ Número de botones florales de 30 plantas. ± Tiempo térmico acumulado por trimestre.

Un efecto contrario al del tiempo térmico acumulado (TT) sobre la floración sucede con la amplitud térmica (AT), debido a que en la medida en que aumenta el número de días con amplitudes térmicas inferiores a 10°C (diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria) se reduce la floración, dicha relación es estadísticamente significativa para las estaciones de La Trinidad y Santander (Tabla 8). Cabe anotar, que hay localidades en donde la floración se relaciona mejor con la amplitud térmica (AT) que con el déficit hídrico, tal y como sucede con la estación Santander.

El promedio de la amplitud térmica en las estaciones analizadas se ubica entre $10,9^{\circ}\text{C}$ (Paraguaicito) y $6,8^{\circ}\text{C}$ (Santander). La máxima amplitud térmica se registró en la estación Paraguaicito, con $19,0^{\circ}\text{C}$, mientras que para la estación Santander la máxima llegó hasta $11,0^{\circ}\text{C}$ (Tabla 9).

Al parecer, uno de los factores más limitantes para la floración en la estación Santander es la amplitud térmica, dicha estación durante el período analizado mostró más del 90% de los días con amplitudes térmicas inferiores a 10°C (Figura 4).

Tabla 8. Relación entre el número de botones florales en café con la amplitud térmica (AT) inferior a 10°C.

Estación	Modelo	Significancia
El Rosario	$NBF^f = -206,79AT^{\pm}$ ($R^2=0,40$)	
La Catalina	$NBF = -120,09 AT$ ($R^2=0,29$)	
La Trinidad	$NBF = -100,09 AT$ ($R^2=0,73$)	**
El Tambo	$NBF = -43,78 AT$ ($R^2=0,13$)	
Naranjal	$NBF = -151,58 AT$ ($R^2=0,34$)	
Paraguaicito	$NBF = -199,49 AT$ ($R^2=0,23$)	
Santander	$NBF = -1462,35 AT$ ($R^2=0,61$)	*

Tabla 9. Rangos observados para la amplitud térmica en la zona de estudio (2008-2010)

Estación	Amplitud térmica (°C)		
	Máxima	Mínima	Promedio
Paraguaicito	18,0	2,4	10,9
La Catalina	15,6	1,7	10,0
Naranjal	15,6	2,2	9,8
El Tambo	19,0	3,4	9,4
El Rosario	12,4	1,8	8,4
La Trinidad	14,8	2,7	8,4
Santander	11,0	2,0	6,8

Relación entre la floración y la disponibilidad energética.

Existe una relación negativa entre el índice de déficit de brillo solar (IDBS) y el número de botones de florales en café (Tabla 10), lo que indica que días de bajo brillo solar no favorecen el número de botones florales, dicha relación es estadísticamente significativa para la estación experimental La Trinidad, en donde por cada hora que se reduzca en brillo solar respecto a su potencial, el número de botones florales/30 plantas se reduce en 1.232 lo que indica que en localidades con condiciones climáticas similares a La Trinidad (Libano, Tolima), el brillo solar es un factor limitante en la floración del café.

Efectos combinados de las variables.

Dado que hubo respuestas diferenciales en cada una de las localidades a los estímulos ambientales de déficit y exceso hídrico, de

temperatura y de brillo solar, se realizó un análisis combinado de dichas variables (IDH, IHS, TT, AT y IDBS) con el propósito de identificar efectos sinérgicos entre ellas, y poder identificar que grupo de estas variables explican mejor la floración, por localidades, por zona y por trimestre.

En la estación experimental El Rosario el número de días con déficit hídrico, tanto moderado ($IDH < 0,8$) como fuerte ($IDH < 0,3$), combinados con el tiempo térmico, con el número de días con amplitud térmica inferior a 10°C y el déficit de brillo solar (N-n) explican entre un 92% y un 97% el fenómeno de floración (Tabla 11). En las estaciones La Trinidad, El Tambo y Naranjal el déficit hídrico fuerte ($IDH < 0,3$) y el número de días con amplitud térmica inferior a 10°C ($AT < 10$) explican el 85%, 72% y 76% del fenómeno, respectivamente. En la estación

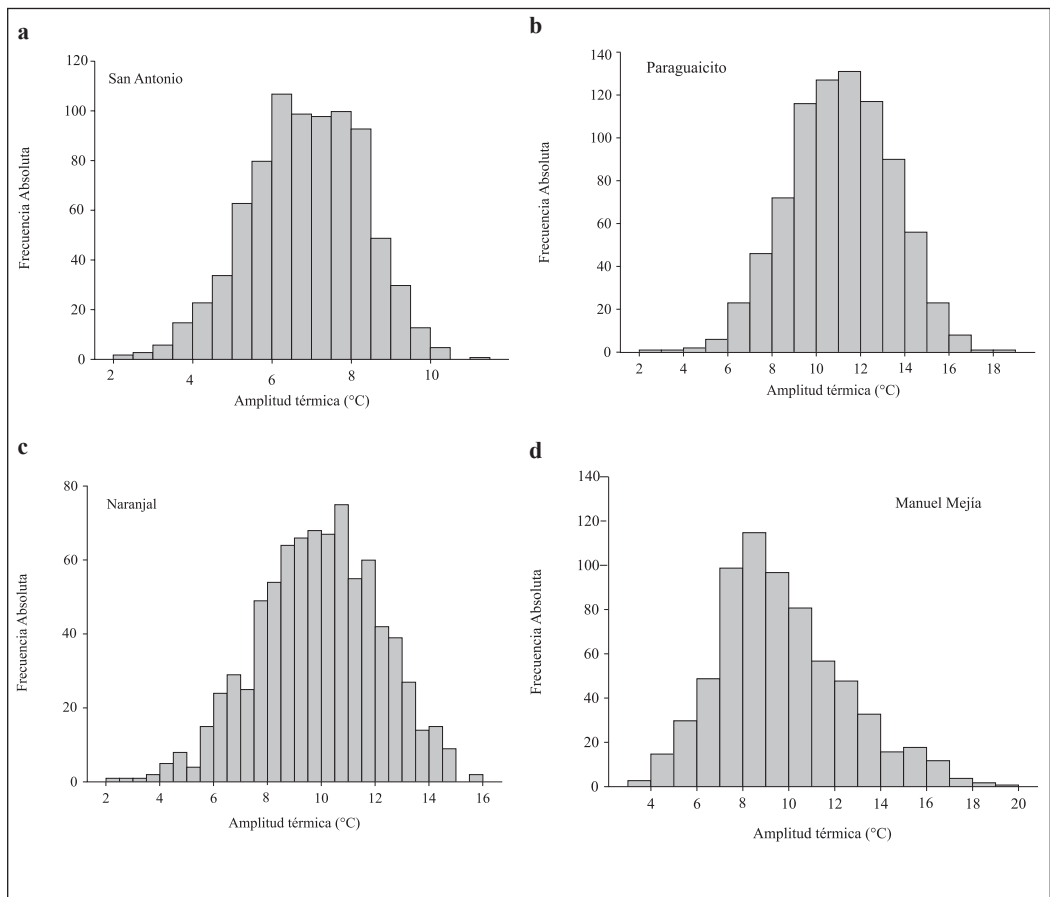


Figura 4. Distribución de la amplitud térmica en cuatro estaciones de la zona cafetera colombiana en el período enero de 2008 a marzo 2010.

Tabla 10. Relación entre el número de botones florales en café con el déficit de brillo solar (N-n).

Estación	Modelo	Significancia
El Rosario	($R^2=0,05$)	
La Catalina	$NBF^{\text{£}} = -1581,86$ (N-n) \pm ($R^2=0,22$)	
La Trinidad	$NBF = -1231,91$ (N-n) ($R^2=0,59$)	*
El Tambo	($R^2=0,00$)	
Naranjal	$NBF = -1428,56$ (N-n) ($R^2=0,11$)	
Paraguaicito	($R^2=0,04$)	
Santander	$NBF = 27,18$ (N-n) ($R^2=0,21$)	

*= $p<0,05$; ** $p<0,01$. N= Brillo solar astronómico posible; n= Brillo solar medido. £ Número de botones florales de 30 plantas por trimestre. \pm Déficit de brillo solar promedio del trimestre (horas/día).

Tabla 11. Efectos de la disponibilidad de agua, temperatura y brillo solar en la floración de café.

Estación	Número de predictores (K)	R ²	Estación	Número de predictores (K)	R ²
El Rosario	IDH<0,8; TT	0,79*	Naranjal	IDH<0,8; TT	0,51
	IDH<0,8; TT; AT<10	0,79*		IDH<0,8; TT; AT<10	0,53
	IHS<0,5; TT	0,69*		IHS<0,5; TT	0,74*
	IHS<0,5; TT; AT<10	0,69		IHS<0,5; TT; AT<10	0,77
	<i>IHS>0,5; AT<10</i>	0,68*		<i>IHS>0,5; AT<10</i>	0,77**
	IDH<0,8; TT; AT<10; N-n	0,97*		IDH<0,8; TT; AT<10; N-n	0,53
	IDH<0,3; TT; AT<10; N-n	0,92		IDH<0,3; TT; AT<10; N-n	0,79
IDH<0,3; AT<10	0,77*	IDH<0,3; AT<10	0,76*		
La Catalina	IDH<0,8; TT	0,12	Paraguaicito	IDH<0,8; TT	0,47
	IDH<0,8; TT; AT<10	0,59		IDH<0,8; TT; AT<10	0,48
	IHS<0,5; TT	0,23		IHS<0,5; TT	0,69*
	IHS<0,5; TT; AT<10	0,34		IHS<0,5; TT; AT<10	0,69
	<i>IHS>0,5; AT<10</i>	0,32		<i>IHS>0,5; AT<10</i>	SEC
	IDH<0,8; TT; AT<10; N-n	0,61		IDH<0,8; TT; AT<10; N-n	0,89
	IDH<0,3; TT; AT<10; N-n	0,61		IDH<0,3; TT; AT<10; N-n	0,79
IDH<0,3; AT<10	0,48	IDH<0,3; AT<10	0,48		
La Trinidad	IDH<0,8; TT	0,83*	Santander	IDH<0,8; TT	0,28
	IDH<0,8; TT; AT<10	0,83*		IDH<0,8; TT; AT<10	0,80*
	IHS<0,5; TT	0,84*		IHS<0,5; TT	0,49
	IHS<0,5; TT; AT<10	0,86*		IHS<0,5; TT; AT<10	0,62
	<i>IHS>0,5; AT<10</i>	0,75*		<i>IHS>0,5; AT<10</i>	SEC
	IDH<0,8; TT; AT<10; N-n	0,84		IDH<0,8; TT; AT<10; N-n	0,89
	IDH<0,3; TT; AT<10; N-n	0,86		IDH<0,3; TT; AT<10; N-n	0,72
IDH<0,3; AT<10	0,85**	IDH<0,3; AT<10	0,66		
El Tambo	IDH<0,8; TT	0,21			
	IDH<0,8; TT; AT<10	0,22			
	IHS<0,5; TT	0,12			
	IHS<0,5; TT; AT<10	0,2			
	<i>IHS>0,5; AT<10</i>	SEC			
	IDH<0,8; TT; AT<10; N-n	0,43			
IDH<0,3; TT; AT<10; N-n	0,90				
IDH<0,3; AT<10	0,72*				

IDH<0,8= Número de días con índices de déficit hídrico inferior a 0,8; TT = Tiempo térmico; AT<10 = Número de días con amplitud térmica inferior a 10°C.; SEC= Sin exceso crítico; N-n= Brillo solar astronómico menos brillo solar medido “déficit de brillo solar” o índice de déficit de brillo solar. *= significancia al 5%; *p<0,05; **p<0,01.

experimental Paraguaicito el número de días con déficit hídrico moderado ($IDH < 0,5$) y el tiempo térmico (TT) explican el 69% de la floración, y en la estación Santander el número de días con déficit hídrico moderado ($IDH < 0,8$), el tiempo térmico (TT) y el número de días con amplitud térmica inferior a 10°C ($AT < 10$) explican el 80% de la floración. En la estación La Catalina tanto el número de días con déficit hídrico moderado ($IDH < 0,8$) como fuerte ($IDH < 0,3$), combinados con el tiempo térmico, con el número de días con amplitud térmica inferior a 10°C y el déficit de brillo solar (N-n) explican el 61% de la expresión floral.

Por otra parte, cuando se combina el exceso hídrico representado en el número de días con el índice de humedad del suelo superior a 0,5 ($IHS > 0,5$) con el número de días con amplitud térmica inferior a 10°C ($AT < 10$), se explica en más del 60% las disminuciones de la floración (Tabla 11).

Análisis por trimestre. Con el propósito conocer en qué trimestres ocurre una mejor relación con las variables agrometeorológicas, se hizo un análisis de la floración trimestral, en el cual se incluyeron todas las estaciones del estudio. Del análisis anterior se encontró que la floración del café en Colombia para los trimestres agosto-septiembre-octubre, febrero-marzo-abril y mayo-junio-julio, se relacionan con los índices agrometeorológicos propuestos en este estudio (Figura 5). En el trimestre agosto-septiembre-octubre la floración del café responde tanto al déficit hídrico, como al tiempo térmico y la amplitud térmica; cuando estos dos últimos factores se incluyen, la floración se explica en un 80%.

Para el trimestre agosto-septiembre-octubre, la inclusión del déficit de brillo solar (DBS), no influyó en la floración, esto no significa que no sea importante, sino que es una de las épocas del año en donde se

presenta el menor déficit de brillo solar en la mayoría de las localidades estudiadas, a excepción de la estación Santander, donde el menor DBS se presenta en los trimestres de noviembre-diciembre-enero y febrero-marzo-abril (Figura 6).

En el trimestre febrero-marzo-abril el déficit hídrico por sí solo no explica la floración (Figura 5E), al igual que en el trimestre de agosto-septiembre-octubre, y la inclusión de las variables AT, TT y DBS explican el 80% del proceso fisiológico, mostrando un efecto sinérgico de las variables hídricas, térmicas y de radiación; por lo tanto, además de los cambios de humedad del suelo, deben considerarse la temperatura acumulada, los cambios diarios de temperatura y el brillo solar.

En el caso del trimestre mayo-junio-julio, el déficit de brillo solar es la variable que mejor explica la floración (Figura 5C), y aunque se observa el efecto sinérgico del tiempo térmico, de la amplitud térmica y el déficit hídrico, el modelo no alcanza a ser estadísticamente significativo, por lo tanto, se puede afirmar que el factor más determinante en la floración durante este trimestre es el brillo solar, porque es en éste en donde seis de las siete estaciones estudiadas presentan el mayor déficit de brillo solar (superior a 7,8 horas), el cual se podría considerar como el nivel crítico superior (Figura 6). Por otra parte, al correlacionar los trimestres de mayor floración con el DBS, se encontró que el brillo solar deja de ser limitante para la floración cuando el DBS es inferior a 7,2 horas/día promedio por trimestre.

Al mirar el efecto del exceso hídrico sobre la floración por trimestre, se observa que el trimestre de agosto-septiembre-octubre es el más susceptible al exceso hídrico (Figura 7), el cual tiene un efecto sinérgico con la amplitud térmica. Lo anterior es especialmente

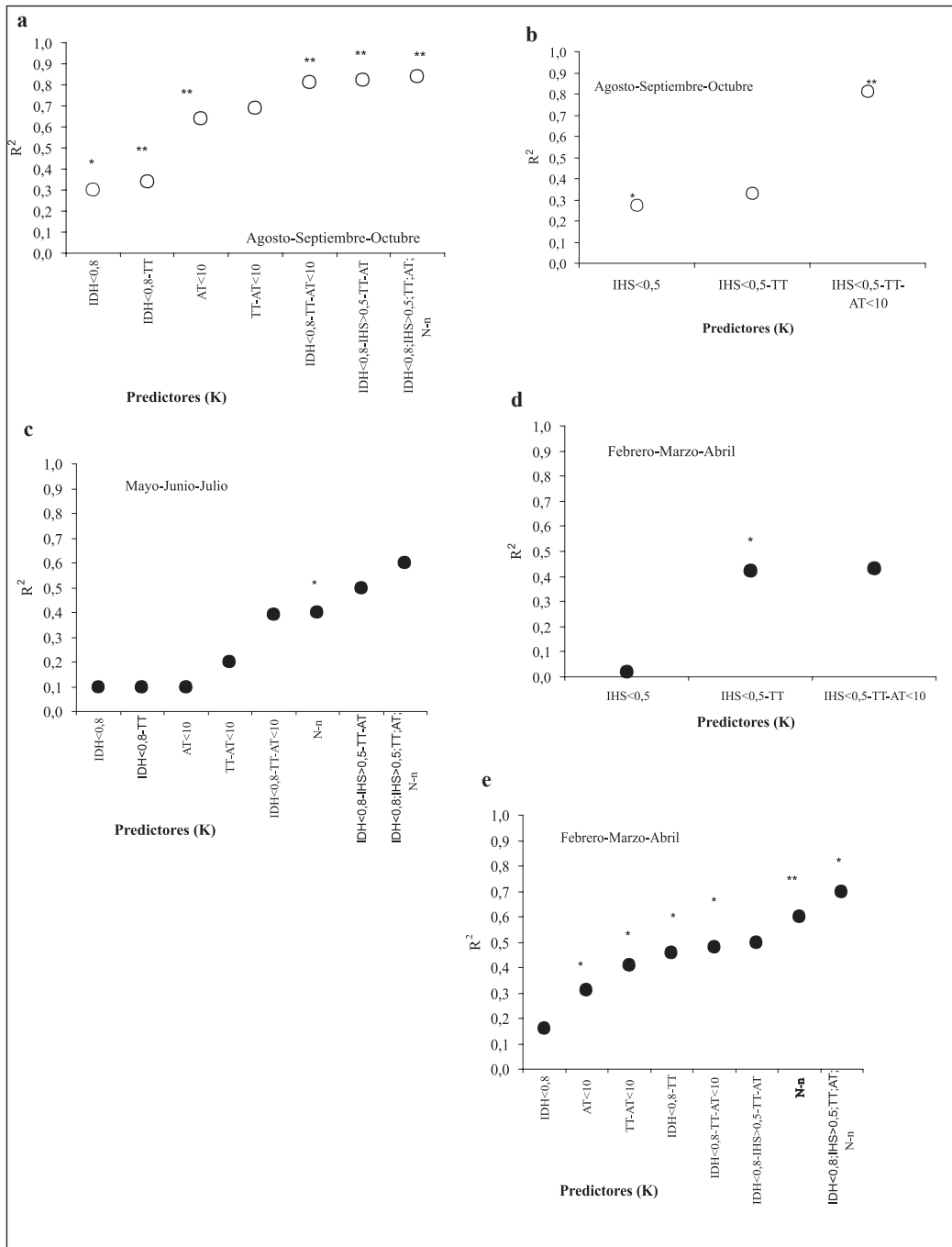


Figura 5. Combinación de variables (número de predictores-K) que mejor explican el número de botones florales en café con déficit hídrico moderado **a,c** y **e** , y déficit hídrico fuerte **b** y **d**, para los trimestres de agosto-septiembre-octubre, febrero-marzo-abril y mayo-junio-julio, en las zonas de estudio de la floración del café en Colombia. * = significancia al 5%; * = $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Figura 6. Déficit de brillo solar promedio (horas/día), para siete localidades de la zona cafetera Colombiana, durante el período 2008-20010.

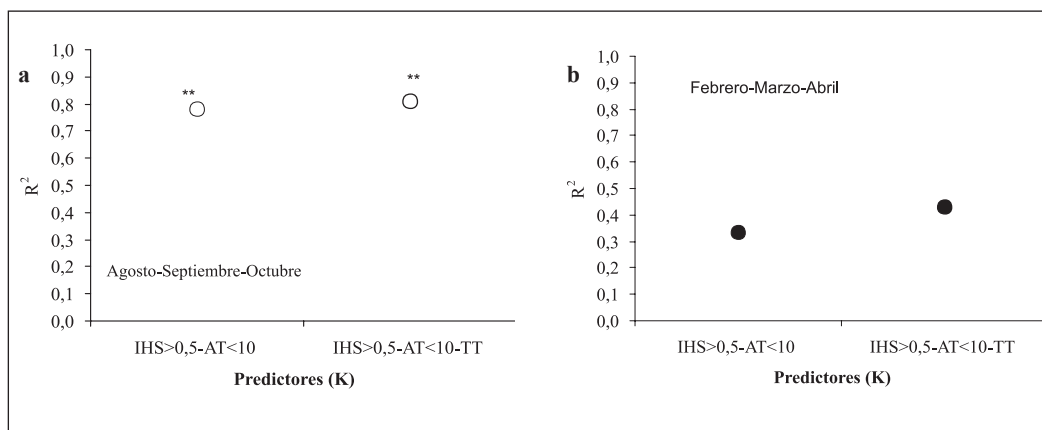
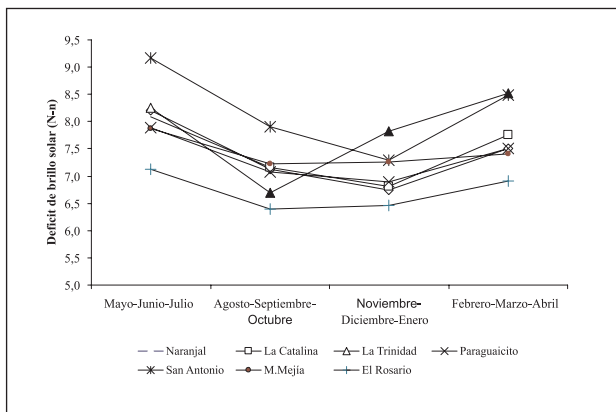


Figura 7. Combinación de predictores que mejor explican el número de botones florales en café con el exceso hídrico **a.** agosto-septiembre-octubre; **b.** febrero-marzo-abril. * = $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

crítico en las zonas donde están ubicadas las estaciones El Tambo (El Tambo, Cauca), La Trinidad (Libano, Tolima) y Paraguaicito (Buenavista, Quindío), en las que se presenta la mayor floración del año en ese trimestre (Figura 2). Además, es crítico porque es la época del año en la cual los otros factores considerados limitantes de la floración no lo son, como el caso del DBS (Figura 6) y la AT (Figura 9) para las zonas centro y sur del país.

Análisis por zonas. De acuerdo con los patrones de floración se dividió la zona de estudio en centro y sur. La zona centro

comprendida por las estaciones Naranjal (Caldas), La Catalina (Risaralda), Santander (Santander) y El Rosario (Antioquia), y la zona sur comprendida por las estaciones La Trinidad (Tolima), El Tambo (Cauca) y Paraguaicito (Quindío).

Para la zona centro, tanto el déficit hídrico, el tiempo térmico y la amplitud térmica influyeron en la floración (Figura 8A), y para la zona sur el déficit hídrico, la amplitud térmica y el brillo solar influyeron en la floración. Para ambas zonas, los coeficientes de determinación son bajos (inferiores a 0,5), pero estadísticamente significativos.

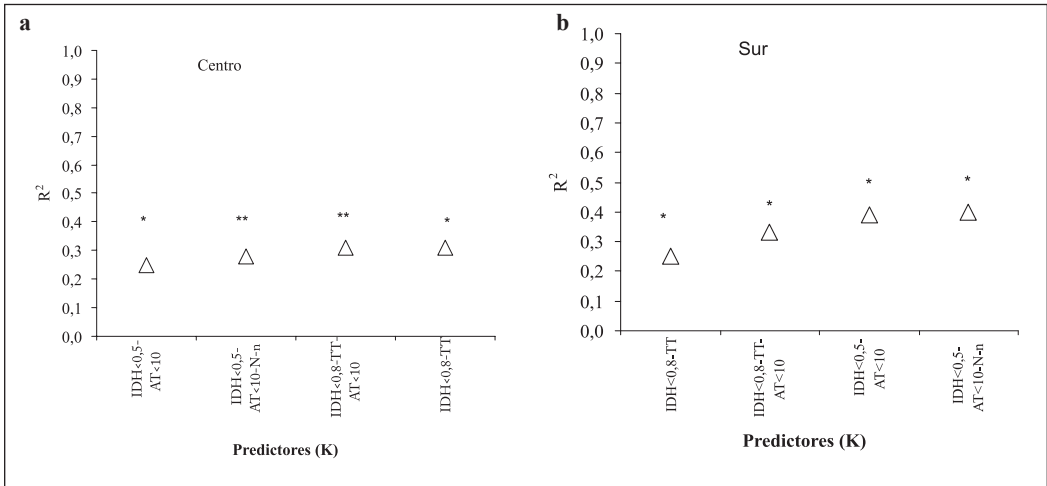


Figura 8. Análisis de número de predictores que explican la relación entre el número de botones florales en café por zonas **a.** Centro (Naranjal, La Catalina, Santander y El Rosario) y **b.** Sur (La Trinidad, El Tambo, Paraguaicito). * = significancia al 5%; ** = p<0,05; *** = p<0,01

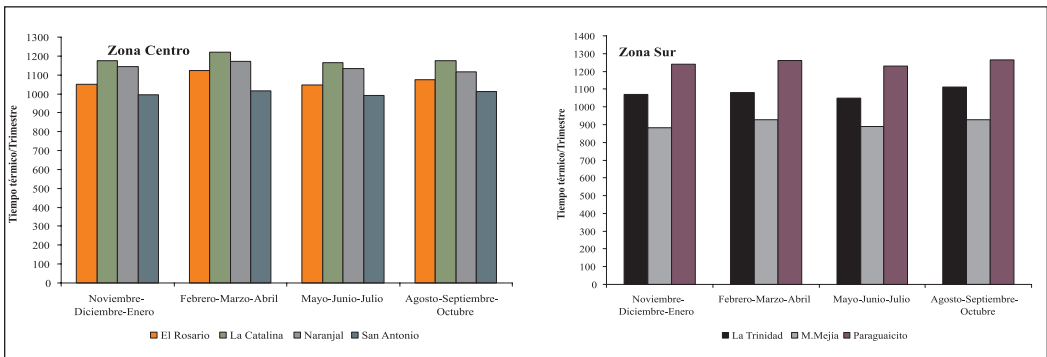


Figura 9. Amplitud térmica (AT) promedio mensual para las estaciones consideradas en el estudio **a.** Zona centro y **B.** Zona sur.

De la combinación de los índices agrometeorológicos descritos anteriormente y su relación con la floración, se sugiere que la floración del café responde al déficit hídrico en la medida en que los cambios térmicos diarios, la acumulación térmica y la disponibilidad de energía sean apropiados (Tabla 12). En el trimestre agosto-septiembre-octubre en la zona sur y en la zona centro, la floración de café responde a los déficits hídricos moderado y fuerte, debido a que hay una adecuada acumulación térmica, los cambios termicos diarios han sido apropiados

y la disponibilidad energética se encuentra cerca del potencial. En los otros trimestres, tanto en la zona centro como de la zona sur, la respuesta de la floración al déficit hídrico está condicionada por los otros factores limitantes (Tabla 12).

Índices hidroheliotérmicos y floración. Con el propósito de contar con una herramienta que pueda ser empleada a futuro para inferir si las condiciones agrometeorológicas son apropiadas para una buena floración del café, se propusieron varios índices que

Tabla 12. Posibilidad que el déficit hídrico favorezca la floración del café por épocas del año y zonas.

Trimestre	Zona	Factores limitantes			Posibilidad de respuesta al déficit hídrico	
		DBS	TT	AT	Moderado	Fuerte
Ago-Sep-Oct	Centro	NL	NL	NL	Alta	Muy Alta
	Sur	NL	NL	NL	Alta	Muy Alta
Feb-Mar-Abr	Centro	L	NL	NL	Media	Alta
	Sur	L	NL	L	Baja	Media
May-Jun-Jul	Centro	L	NL	L	Baja	Media
	Sur	L	NL	L	Baja	Media
Nov-Dic-Ene	Centro	NL	NL	L	Media	Alta
	Sur	L	NL	L	Baja	Media

DBS: Déficit de brillo solar; TT: Tiempo térmico acumulado; AT: Amplitud térmica; L: Limitante; NL: No Limitante

integran los factores considerados en este estudio como limitantes de la floración y descritos anteriormente. A dichos índices, se les denominó índices hidroheliotérmicos, y dependiendo del tipo de información que usan se clasifican en:

Índice Hidroheliotérmico (I.Hi.He.T) **Ecuación** <<7>>

$$I.Hi.He.T = \frac{N^\circ \text{ dias IHS} <0,8}{110} * \frac{TT}{1.768} * \frac{20}{N^\circ \text{ dias AT} <10} * \frac{12-(N-n)}{12}$$

<<7>>

Índice Hidrotérmico (I.Hi.T) **Ecuación** <<8>>

$$I.Hi.T = \frac{N^\circ \text{ dias IHS} <0,8}{110} * \frac{TT}{1.768} * \frac{20}{N^\circ \text{ dias AT} <10}$$

<<8>>

Índice Heliotérmico tipo I (I.He.T) **Ecuación** <<9>>

$$I.Hi.He.T = \frac{TT}{1.768} * \frac{12-(N-n)}{12}$$

<<9>>

Índice Heliotérmico tipo II (I.He.T) **Ecuación** <<10>>

$$I.Hi.He.T = \frac{20}{N^\circ \text{ dias AT} <10} * \frac{12-(N-n)}{12}$$

<<10>>

Índice Heliotérmico tipo III (I.He.T) **Ecuación** <<11>>

$$I.Hi.He.T = \frac{TT}{1.768} * \frac{20}{N^\circ \text{ dias AT} <10} * \frac{12-(N-n)}{12}$$

<<11>>

Los índices anteriores se correlacionaron con el número de botones florales de los trimestres agosto-septiembre-octubre y febrero-marzo-abril (Tabla 13). En el trimestre agosto-septiembre-octubre el índice hidrotérmico mostró coeficientes de correlación similares a los heliotérmicos tipo II y tipo III, lo que corrobora lo descrito anteriormente en el sentido que el déficit de brillo solar, no es un limitante en la floración en este trimestre y, por lo tanto, no es necesario incluirlo, pero sí es necesario incluir la amplitud térmica, debido a que el índice heliotérmico tipo I no presentó correlación con el número de botones florales para dicho trimestre. Caso contrario a lo observado en el trimestre

febrero-marzo-abril, en donde el déficit de brillo solar es un factor limitante en la predicción de la floración en café, al igual que el tiempo térmico (Tabla 13).

Por zonas (centro y sur), los índices hidrotérmico (I.Hi.T) e hidroheliotérmico (I.Hi.He.T) presentaron la mayor correlación con la floración del café (Tablas 14 y 15), y potencialmente podrían ser empleados para

Tabla 13. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los índices hidroheliotérmicos y el número de botones florales/30 plantas de café por trimestre.

Índices Hidroheliotérmicos	Ago-Sep-Oct	Feb-Mar-Abr	May-Jun-Jul	Nov-Dic-Ene
	Coeficiente de correlación, r			
I.Hi.T	0,84**	0,62*	-0,01	0,16
I.Hi.He.T	0,83**	0,63*	0,06	0,20
I.He.T (Tipo I)	0,42	0,82**	0,48	0,43
I.He.T (Tipo II)	0,85**	0,63*	0,37	0,20
I.He.T (Tipo III)	0,80**	0,63*	0,32	0,21

*= $p < 0,05$; **= $p < 0,01$

Tabla 14. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los índices hidroheliotérmicos y el número de botones florales/30 plantas de café por zona.

Índices Hidroheliotérmicos	Zona centro (El Rosario - Naranjal)	Zona sur (La Trinidad - El Tambo - Paraguaicito ¹)
	Coeficiente de correlación, r	
I.Hi.T	0,8**	0,8**
I.Hi.He.T	0,8**	0,7**
I.He.T (Tipo I)	0,4	0,5
I.He.T (Tipo II)	0,4	0,7
I.He.T (Tipo III)	0,4	0,7

¹ Para la estación Paraguaicito se eliminaron los trimestres mayo-junio-julio y noviembre-diciembre-enero. *= $p < 0,05$; **= $p < 0,01$.

Tabla 15. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los índices hidroheliotérmicos y el número de botones florales/ treinta plantas de café por zona.

Índices Hidroheliotérmicos	Zona Centro (El Rosario-Naranjal-La Catalina ¹)	Zona Sur (La Trinidad-M.Mejía-Paraguaicito ²)
	Coeficiente de correlación, r	
I.Hi.T	0,6*	0,8*
I.Hi.He.T	0,6*	0,7*
I.He.T (Tipo I)	0,4	0,5
I.He.T (Tipo II)	0,4	0,7*
I.He.T (Tipo III)	0,5	0,7*

¹ Para La Catalina se eliminó el trimestre agosto-septiembre-octubre, que aporta menos del 10% de la floración anual para esta zona. ² Para Paraguaicito se eliminaron los trimestres mayo-junio-julio y noviembre-diciembre-enero, que aportan menos del 20% de la floración. *= $p < 0,05$; **= $p < 0,01$

evaluar si las condiciones agrometeorológicas son o no favorables para una buena floración del café en esas zonas.

Para emplear los índices hidrotérmicos (I.Hi.T) e hidroheliotérmicos (I.Hi.He.T), es necesario definir los niveles óptimos y los niveles críticos de estos índices, por lo tanto se analizó la floración relativa para los dos trimestres en donde la floración representa los mayores porcentajes del año. La floración relativa se estimó dividiendo la floración observada sobre la máxima floración del trimestre multiplicada por 100 (Figura 11).

El 80% de la floración relativa se alcanza cuando el índice hidrotérmico (I.Hi.T) es superior a 0,4 y cuando el índice hidroheliotérmico (I.Hi.He.T) es superior a 0,16 (Figura 11), estos valores podrían ser considerados como los valores óptimos. El 20% de la floración relativa se alcanza cuando el índice hidrotérmico (I.Hi.T) es inferior a 0,10 y cuando el índice hidroheliotérmico (I.Hi.He.T) es inferior a 0,05, valores considerados como críticos por trimestre o valores por debajo de los cuales no estarían dadas las condiciones para una buena floración.

DISCUSIÓN

En algunas especies de árboles perennes en zonas tropicales se presenta una fuerte inducción floral por disminución en el fotoperíodo, Rivera y Borchert (31) reportan que reducciones en 30 min. del fotoperíodo inducen floración en varias especies forestales en Costa Rica. En café, evidencias experimentales de Cannell (10), Franco (16) y Piringer y Borthwick (28) indican que el café es una especie de días cortos y que en la medida que se aumenta el fotoperíodo, por encima de 12 h, se alarga el inicio de la floración, lo anterior indica que plantas bajo días largos retardan la inducción floral, tanto en plantas jóvenes o en plantas de primera floración. Barros *et al.* (6), al

revisar los trabajos de fotoperíodo en café, concluyen de los anteriores autores que en plantas jóvenes de café o plantas de primera cosecha, la floración responde a días cortos, pero cuando éstas son adultas no responden al fotoperíodo (plantas neutras). Lo anterior podría correlacionarse con el hecho de que en plantas adultas hay presencia de frutos, lo que influye sobre la relación fuente/vertedero y retarda la diferenciación floral (22), por eso no hay respuesta al fotoperíodo ni a los otros estímulos ambientales. Por otra parte, la relación negativa entre el déficit de brillo solar (DBS) y el número de botones florales indicada en este estudio, obedece al afecto que tiene el brillo solar en la formación de nudos. Castillo (11), encontró que en la medida que se aumentaba el sombrío en café se disminuía el número de glomérulos por nudo y el número de flores por glomérulo. De manera similar, Jaramillo y Valencia (20) afirman que existe una correlación positiva entre el número de flores en café y el brillo solar (Estación Naranjal).

En zonas ecuatoriales en donde el fotoperíodo es inferior a 13 horas, la inducción floral del café se relaciona con los cambios en la temperatura (día/noche) y con el déficit hídrico. Myster y Moe (25) indican que las plantas son más sensibles a las fluctuaciones de temperatura en días cortos que en días largos. Mes (24) estudió diferentes combinaciones de temperatura día/noche en cuatro variedades de café (*Coffea arabica*) y observó que la iniciación floral en café fue estimulada cuando la relación temperatura día/noche fue de 23°/17°C e inhibida cuando fue superior a 30°C e inferior de 17°C. El desarrollo posterior de las flores fue acelerado a altas temperaturas y retardado a bajas temperaturas. Desarrollo anormal de las flores (flores estrelladas) o aborto floral fueron observados cuando las relaciones de temperatura día/noche fueron de 30°/24°C. Barros *et al.* (6) al analizar los

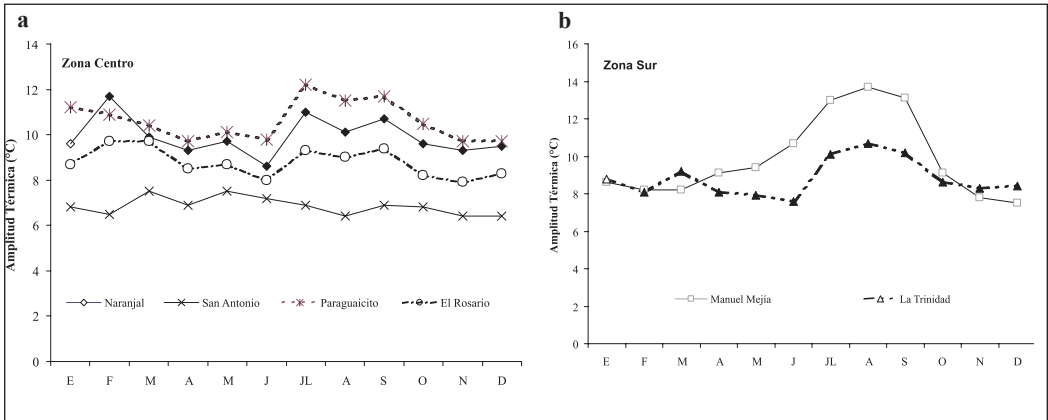


Figura 10. Tiempo térmico acumulado por trimestre por zonas: A. Centro (Naranjal, La Catalina, Santander y El Rosario) y B. Sur (La Trinidad, El Tambo, Paraguaicito).

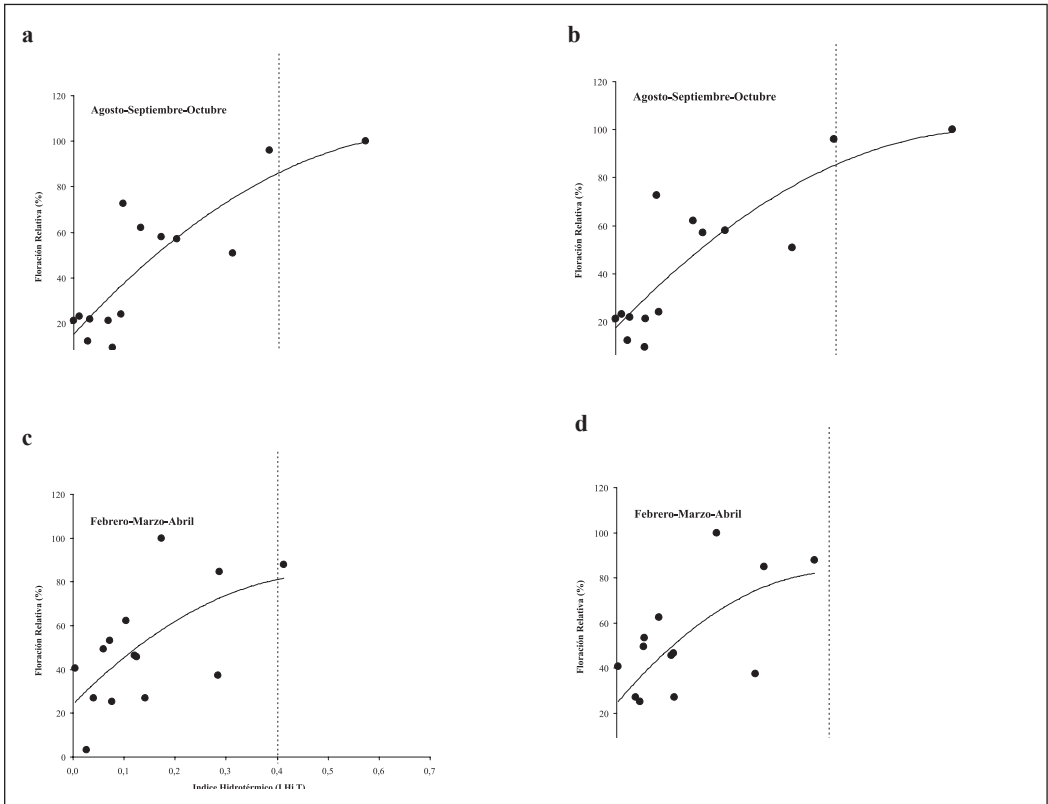


Figura 11. Niveles óptimos para los trimestres agosto-septiembre-octubre y febrero-marzo-abril de los índices hidrotérmicos. A y C para el índice hidrotérmico. B y D para el índice hidrotérmico por trimestre.

trabajos de Mes y de Went sobre el efecto de la temperatura en la floración de café afirman que temperaturas promedio día/noche (23°/17°C) estimulan la iniciación floral en café, y que altas temperaturas (30°/24°C) marchitan las flores o inducen el fenómeno conocido como “flor estrellada”, y que temperaturas más bajas (23°/17°C) inhiben la floración. Lo anterior coincide con lo establecido para otras especies por autores como Erwin et al. (15), Myster y Moe (25) y Thingnaes et al. (34), en el sentido de que las variaciones diarias de temperatura influyen directamente sobre la longitud de entrenudos, altura de las plantas y en la floración. Adicionalmente, Myster and Moe (25) afirman que las diferencias diarias de temperatura y caídas de temperatura, tienen efectos similares al de los estimuladores de crecimiento, coincidiendo con lo reportado en este estudio relacionado con que los cambios diarios de temperatura (altas amplitudes térmicas), favorecerían el acondicionamiento de las yemas florales para la preantesis, generando un efecto similar al del déficit hídrico.

Además de los cambios de temperatura entre el día y la noche, la iniciación floral del café, se conjuga con un estrés hídrico moderado (6), lo que no está claro aún, es si ambos estímulos ambientales actúan de manera sinérgica o son mutuamente excluyentes o cada uno por separado puede inducir el proceso de floración de manera independiente. Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que hay un efecto sinérgico, pero que también pueden actuar independientemente dependiendo de la época, y que además habría una competencia entre el llenado de granos y la diferenciación floral, aspecto que se debe de corroborar experimentalmente bajo nuestras condiciones, y que es discutido más adelante.

Los resultados también indican que la relación entre la temperatura del aire y la floración del café es un fenómeno que debe de verse de dos maneras: i) el efecto de la temperatura sobre el crecimiento o formación de nudos en las ramas, la cual se explica por la relación directa entre el tiempo térmico y el número de botones florales. En Brasil se estimó que las yemas terminan la madurez y entran en dormancia cuando han acumulado 1.590°C de tiempo térmico calculados con una temperatura base de 10°C (Santos citado por Meireles et al. (23)); ii) el efecto de los cambios de temperatura a nivel diario sobre la inducción o la diferenciación floral o sobre el rompimiento de la latencia. Probablemente cuando la amplitud térmica es inferior a 10°C, los botones florales están en estado de latencia, lo anterior representado en la relación negativa entre el número de días con amplitud térmica inferior a 10°C y el número de botones florales, lo que indica que además del “choque hídrico” es necesario el “choque térmico” (amplitud térmica >10°C) para romper la latencia o para que su ruptura sea más efectiva, o para favorecer la inducción y la diferenciación, aspecto que debe de estudiarse con mayor detalle.

Hasta ahora se puede afirmar que el período de iniciación floral hasta la antesis es interrumpido por un período conocido como dormancia o latencia, que puede durar entre unas cuantas semanas o meses, dependiendo de las condiciones ambientales, regularmente la estacionalidad de los períodos secos/húmedos (13) o cambios de temperatura o brillo solar a nivel diario, como se indica en este estudio.

Barros et al. (6) al hacer una revisión sobre el efecto de la temperatura en la apertura floral en café, identifican tres situaciones en donde hay rompimiento de dormancia en las yemas florales en café: i) una caída de la temperatura solamente puede romper

la dormancia cuando el nivel hídrico de la planta no es crítico; ii) abundantes lluvias seguidas de un largo período de estrés hídrico, pueden ser efectivas por sí mismas; y iii) caídas súbitas de temperatura y disponibilidad hídrica actúan complementariamente o quizás sinérgicamente. Lo anterior puede verse en el trabajo de Silva et al. (32), quienes desarrollaron un experimento en Brasil, en tres localidades (Adamantina-Mococa y Campinas) en donde evaluaron a partir del mes de abril los tratamientos de: i) no riego del café, ii) riego continuo, iii) suspensión del riego durante 30 días en Julio, iv) suspensión del riego durante 60 días en julio y agosto, y encontraron que la floración independientemente de la localidad y del tratamiento ocurría en el mes de septiembre, pero ésta fue menos uniforme en los tratamientos regados continuamente, en donde la floración se presentó en cuatro períodos que se extendieron hasta fines de noviembre. Los mismos autores encontraron además que en la localidad de Mococa, el tratamiento de 60 días sin riego mostró mayor número de frutos formados, de 10-15 mm de diámetro por rama, mientras que para la localidad de Campinas el mayor número de frutos (10-15mm/rama) fue para el tratamiento con 30 días sin riego, y que los tratamientos de 60 días sin riego y con riego sin interrupción no mostraron diferencias significativas en esa localidad, mientras que en la localidad de Adamantina, no hubo diferencias significativas en los tratamientos, por lo que concluyen que bajo condiciones de campo, la imposición de déficit hídrico controlado por medio del riego no controla en todos los casos la floración del café.

Regularmente se ha asociado al déficit hídrico como el factor acondicionante de la floración, ejemplo de ello, son los reportes de Magalhaes y Angelocci (21) quienes encontraron que se rompía la dormancia

de los botones florales cuando éstos y las hojas subyacentes alcanzaban un potencial hídrico inferior a -1,4 y -1,2 Mpa. Alvim (1) encontró que cuando las plantas de café variedad Típica en Perú, eran mantenidas a suministro hídrico constante con el fin de mantener la humedad del suelo cerca de la capacidad de campo, los botones florales del café permanecían en dormancia y no había formación de fruto. Drinnan y Menzel (14) afirman sobre reducciones significativas en la floración cuando se alcanzaban potenciales hídricos en las hojas de -2,5 Mpa. Lo que sugieren estos resultados es que el estrés hídrico en los botones florales es en sí mismo necesario y que la liberación de la dormancia se empieza a acelerar con un incremento súbito en el potencial hídrico del botón floral (31). Sin embargo, no es una función exclusiva del déficit hídrico, lo que señala que hay otros factores que estarían induciendo estímulos que son favorables para la inducción, diferenciación o ruptura de la latencia, un indicio de ello lo presentan Barros et al. (8), quienes afirman que caídas de temperatura, especialmente nocturnas, inducen el cierre de estomas y el aumento del potencial hídrico de la hoja en café, tanto en suelo con y sin limitaciones de agua, sugiriendo que caídas de temperatura en la noche inducen un estrés hídrico en la planta, y ese estrés hídrico favorecería el acondicionamiento de las yemas florales ejerciendo un efecto similar al del déficit hídrico.

Camayo et al. (9), afirman que el período seco además de concentrar la floración, tiende a acelerar la etapa final de la diferenciación de los botones florales, además dada la existencia de condiciones meteorológicas variables en la zona del estudio (Naranjal, Caldas), la duración de cada uno de los estados de desarrollo floral es variable, representado en períodos de actividad alta y baja.

Majerowicz y Sondahl (22) manifiestan que en condiciones de Campinas (Sao Paulo, Brasil), la inducción y la iniciación floral del café ocurre en los meses de enero y febrero, y la diferenciación inicia en los meses de marzo y abril, caracterizados por una disponibilidad hídrica apropiada a las necesidades de la planta, altas temperaturas y activo crecimiento vegetativo en ramas que no tienen frutos; para ramas con frutos muestran inducción floral entre los meses de octubre a julio (octubre a marzo húmedo y cálido y de abril a julio seco y frío) e inicio de diferenciación en mayo después de cosecha, indicando que en las ramas con frutos se retarda la inducción floral en café, señalando que cambios en la relación fuente/vertedero al final de la acumulación del endospermo de café asociado con una progresiva disminución de la actividad de los meristemos apicales, debido a la reducción de la temperatura del aire y lluvia, puede estar relacionada con el proceso intenso de diferenciación. Además, afirman que la presencia de frutos en las ramas causa una reducción del proceso de diferenciación floral en comparación con las ramas que no tienen frutos.

En el caso de Colombia, se puede afirmar que después de la cosecha ocurre una floración dos meses después, es el caso de las estaciones experimentales de la zona Centro como: Naranjal, La Catalina, Paraguaicito y Santander, en donde la mejor cosecha ocurre en el trimestre octubre-noviembre-diciembre, en los meses de noviembre-diciembre-enero se presenta una buena inducción (cambios en la relación fuente/vertedero) traducido en una floración abundante en el trimestre febrero-marzo-abril, o el caso de la zona sur como las estaciones experimentales La Trinidad y El Tambo, en donde una gran proporción de la cosecha ocurre en los meses de abril-mayo-junio, indicando una inducción durante mayo-junio-julio traducido en la mayor floración del trimestre agosto-septiembre-

octubre, dicha inducción se verá favorecida si las condiciones agrometeorológicas en dichos trimestres (febrero-marzo-abril y agosto-septiembre-octubre) son favorables como se presentó anteriormente, y en el caso de no ser favorables las yemas florales diferenciadas permanecerán latentes.

El hecho de que los trimestres mayo-junio-julio y octubre-noviembre-diciembre no muestren correlación con las variables agrometeorológicas, estaría indicando que los estímulos ambientales en estos trimestres no son suficientes, debido a que la planta está en un proceso activo de llenado de frutos en su mayor porcentaje, ejerciendo un efecto retardante de la diferenciación floral; si se miran las condiciones agrometeorológicas de estos dos trimestres, en la zona centro como en la zona sur, se encuentra que son trimestres con condiciones de crecimiento vegetativo y de llenado activo de frutos, lo que a su vez podría estar retardando la diferenciación y, en consecuencia, un alargamiento de la latencia, lo que se traduce en floraciones dispersas, ya que la edad de los tejidos de las ramas es un factor superpuesto a la influencia climática, lo que indica que hay una competencia entre el crecimiento vegetativo y reproductivo por el mismo ambiente o factores endógenos (7). En la medida que se presenten cambios diarios de temperatura del aire, de agua en el suelo y de radiación, que permitan la ruptura de latencia habrá presencia de botones florales pero dispersos.

En localidades en donde las condiciones agrometeorológicas son favorables para la formación de nudos, la inducción, la iniciación, la diferenciación, el desarrollo la dormancia y la antesis floral se traduce en concentración de la floración y la cosecha, y en consecuencia en una concentración de las épocas en donde se favorece la diferenciación por encima del llenado.

Por otra parte, es importante considerar que el número de botones florales es una función del número de nudos producidos en las ramas, algo que sucede meses atrás a la floración, por lo tanto, factores que influyen en el crecimiento vegetativo se relacionan indirectamente con el número de botones florales, entre ellos, para Colombia es importante resaltar: Precipitación, brillo solar, temperatura y evapotranspiración (17, 20) y disponibilidad de nutrientes y defoliación de la planta (7), por lo tanto al hablar de floración en café es importante considerar la nutrición y la sanidad del cultivo.

Podemos concluir que la floración del café en Colombia es producto de la integración de varios estímulos ambientales como el déficit hídrico, la disponibilidad energética y los cambios diarios de temperatura. La temperatura representada en el tiempo térmico es necesario para definir el tiempo de formación de los nudos y, por ende, las yemas florales, las cuales son el punto de partida de la floración.

El exceso hídrico prolongado, temperaturas altas en la noche o bajas en el día, reducen la floración del café, y su reducción es más fuerte en épocas en donde las demás condiciones meteorológicas son apropiadas o favorables para la floración.

Las zonas en donde la amplitud térmica y el brillo solar es bajo requieren de un estrés hídrico mayor para inducir floración. Localidades en donde el déficit de brillo solar es inferior a 7,2 horas/día promedio y la amplitud térmica es alta mayor que 10oC, la floración responde muy bien al déficit hídrico.

En algunas épocas del año la floración del café está determinada por la disponibilidad energética o brillo solar, y en otras por los cambios diarios de temperatura y el déficit hídrico.

LITERATURA CITADA

1. ALVIM, P de T. Moisture Stress as requirement for flowering of coffee. *Science*. 132:354. 1960.
2. ARCILA P.,J. Crecimiento y desarrollo de la planta de café. En: Arcila P., J.; Farfán V., F.; Moreno B.; A.M.; Salazar G., L.F.; Hincapié G. *Sistemas de producción de café en Colombia*:21-60. 2007
3. ARCILA, P.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. *Annals of Applied Biology* (Inglaterra) 141:19-27.2002
4. ARCILA, P. J.; JARAMILLO, R. A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del café. *Avances Técnicos Cenicafé*. N° 311. 8p. 2003.
5. BARROS, S.R.; MAESTRI, M. Periodicidade de crescimento em café. *Revista Ceres*.19(106): 424-448. 1972.
6. BARROS, R.S.; MAESTRI, M.; COONS, M.P. The physiology of flowering in coffee: A review. *Journal of Coffee Research*.8(2-3):29-73. 1978
7. BARROS, R.S.; MAESTRI, M.; y RENA, B.A. Physiology of growth and production of the coffee tree- A review. *Journal of Coffee Research*.27(1):1-54. 1999.
8. BARROS, S.R.; da Se MOTA, J.W.; DA MATTIA, F.N.; MAESTRI, M. Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. *Field Crop Research*. 54(1): 65-72. 1997.
9. CAMAYO, V., G. C.; CHAVES, C., 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.
10. CANNELL, M.G.R. Photoperiodic response of mature trees of arabica coffee. *Turrialba* (Costa Rica) 22(2):198-206. 1972.
11. CASTILLO, Z. J.; LOPEZ, A. R. Nota sobre el efecto de la intensidad de la luz en la floración del café. *Cenicafé* 17(2):51-60. 1966.
12. CRISOSTO, C.H.; GRANTZ, D.A.; MEINZER, F.C. Effects of the water deficit on flower open in coffee (*Coffea arabica* L.). *Tree Physiology*. 10:127-139. 1992.

13. DRINNAN, J.E. The control of floral development in coffee (*Coffea arabica* L). Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Queensland, Department of Botany. 1992. 195p.
14. DRINNAN, J.E.; MENZEL, C.M. Synchronization of the anthesis and enhancement of vegetative growth in coffee (*Coffea arabica* L.) following water stress during floral initiation. *Journal of Horticultural Science*. 69(5): 841-849. 1994.
15. ERWIN, E.J.; HEINS, R.D.; KARLSSON, M.G. Thermomorphogenesis in *Lilium longiflorum*. *American Journal of Botanic*. 76(1):47-52. 1989.
16. FRANCO, C.M. Fotoperiodismo em cafeeiro *Coffea arabica* L. *Revista do Instituto do Café* 27:1586-1542. 1940.
17. GOMÉZ, G. L. Influencia de los factores climáticos sobre la periodicidad de crecimiento del cafeto. *Cenicafé*.28(1): 3-17. 1977.
18. GOPAL, N.H.; VASUDEVA, N. Physiological studies of flowering in arabica coffee under South Indian conditions. I. Growth of flower buds and flowering. *Turrialba*.23(2):146-153. 1973.
19. JARAMILLO, R. A. Clima andino y café en Colombia. *Cenicafé*. 2005. 192p.
20. JARAMILLO, R.A.; VALENCIA, A.G. Los elementos climáticos y el desarrollo de *Coffea arabica* L., en Chinchina, Colombia. *Cenicafé*.31(4):127-144. . 1980
21. MAGALHAES, A.C.; y ANGELOCCI, L.R. Sudden alterations in water balance associated with flower bud opening in coffee plants. *Journal of Horticulture Science* 51(3):419-423. 1976.
22. MAJEROWICZ, N.; SONDAHL, M. Induction and differentiation of reproductive buds in *Coffea arabica* L. *Brazilian Journal of Plant Physiology*.17(2):247-254. 2005.
23. MEIRELES, E. J.. L. Fenologia do Cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005 / Elza Jacqueline Leite Meireles, Marcelo Bento Paes de Camargo, José Ricardo Macedo Pezzopane, Roberto Antonio Thomaziello, Joel Irineu Fahl, Ludmila Bardin, Júlio César Freitas Santos, Leonardo Biscaro Japiassú, Antonio Wander Rafael Garcia, Antônio Eustáquio Miguel, Roque Antônio Ferreira. – Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica. 128 p (Documentos / Embrapa Café, ISSN 1678-1694 ; 5). 2009.
24. MES, M.G. Estudios sobre la florescencia del *Coffea arabica* L. IBEC Research Institute. No 14.42p. 1957.
25. MYSTER, J.; MOE, R. Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops-a mini review. *Scientia Horticulture*. 62(4):205-215. 1995.
26. NUNES, F.L.; CAMARGO, M.B.P.; FAZUOLI, L.C.; ROLIM, C.D.S.; PEZZOPANE, M. J.R. Modelos agrometeorológicos de estimative de duracao do estadio floracao-maturacao para tres cultivares de café arabica. *Bragantia*, Campinas. 69(4):1011-1018. 2010.
27. PAES, de C. A. Florescimento e fructificacao de café arabica nas diferentes regioes (cafeiras) do Brasil. *Pesquisa Agropeuaria Brasileira*.20(7):831-839. 1985
28. PIRINGER, A.A.; BARTWICK, H.A. Photoperiodic responses of coffee. *Turrialba*.5(3):72-77. 1955.
29. RAMÍREZ, B.V.H.; JARAMILLO, R.A.; ARCILA, P.J. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafé*. 61(1):55-66.2010.
30. RIVERA, G.; BORCHERT, R.. Induction of flowering in tropical trees by 30-min reduction in photoperiod: evidence from field observations and herbarium specimens. *Tree Physiology* 21:201-212. 2001
31. SCHUCH, U.K. Physiology of flowering in *Coffea arabica* L.; role of the growth regulators and water relations. Ph.D Dissertation, Oregon State University. 125p. 1990.
32. SILVA, A.E.; BRUNINI, O.; SAKAIL, E.; ARRUDA, B.F.; PIRES, D.R.C. Influencia de deficits hidricos controlados na uniformizacao do florescimento e producao do cafeeiro em tres diferentes condicoes edafoclimaticas do estado de Sao Paulo. *Bragantia*, Campinas.68(2):493-501. 2009.
33. SUAREZ V.S. Características físicas de los suelos de la zona cafetera de Colombia relacionadas con el uso, manejo y conservación. En: Simposio sobre suelos de la zona cafetera Colombiana, Julio 24-28. *Cenicafé*. 2000. 17p.
34. THINGNAES, E.; TORRE, S.; ERNSEN, A.; MOE, R. Day and night temperature responses in *Arabidopsis*: Effect on gibberellin and auxin content, cell size, morphology and flowering time. *Annals of Botany*.92:601-612. 2003.

35. TROJER, H. El Ambiente climatológico y el cultivo de café en Colombia. Boletín Informativo del Centro Nacional de Investigaciones de Café.5(57):22-37. 1954.
36. WORMER, T.M.; GITUANJA, J. Floral initiation and flowering of *C. arabica* L. Kenya Experimental Agriculture. 6(2):157-170. . 1970
37. ZACHARIAS, O.A.; CAMARGO, M.B.P.; FAZUOLI, L.C. Modelo agrometeorológico de estimativa do inicio da florada plena do cafeeiro. Bragantia, Campinas.67(1): 249-256. 2008.