

Cenicafé

Revista del
Centro Nacional de Investigaciones de Café



Volumen 63 Número 1

Enero - Junio 2012



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

Ministro de Hacienda y Crédito Público

Mauricio Cárdenas Santamaría

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

Aurelio Iragorri Valencia

Ministro de Comercio, Industria y Turismo

Cecilia Álvarez Correa

Director del Departamento Nacional de Planeación

Simón Gaviria Muñoz

COMITÉ NACIONAL

Periodo 1° enero/2011- diciembre 31/2014

JoséFernando Montoya

Eugenio Vélez Uribe

Luis Javier Trujillo Buitrago

Fernando Castro Polanía

Carlos Roberto Ramírez Montoya

Francisco Javier Pérez Marín

Fernando Castrillón Muñoz

Carlos Alberto Cardona Cardona

Jorge Julián Santos Orduña

Aura Teresa Pérez

Alfredo Yáñez Carvajal

Crispín Villazón de Armas

Iván Pallares Gutiérrez

Jorge Cala Robayo

Gerente General

LUIS GENARO MUÑOZ ORTEGA

Gerente Administrativo

LUIS FELIPE ACERO LÓPEZ

Gerente Financiero

JULIÁN MEDINA MORA

Gerente Comercial

CARLOS ALBERTO GONZÁLES

Gerente Comunicaciones y Mercadeo

LUIS FERNANDO SAMPER GARTNER

Gerente Técnico

CARLOS ARMANDO URIBE FANDIÑO

Director Investigación Científica y Tecnológica

FERNANDO GAST HARDERS

Uso del material de esta revista:

Aquellas personas que deseen usar en otras publicaciones, ilustraciones o datos publicados en la Revista Cenicafe, deben obtener el permiso del Centro Nacional de Investigaciones de Café y del autor del artículo y reconocer por escrito los créditos a la Revista Cenicafe como fuente original del material.

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

La Revista Cenicafe, órgano divulgativo del Programa de Investigación Científica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y el Fondo Nacional del Café se publica semestralmente.

Editada en Enero 2014
Tel: 57(6)8506550 Fax: 57(6)8504723 A.A.: 2427 Manizales
E-mail: cenicafe@cafedecolombia.com
www.cenicafe.org

Cenicafé

Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café

Manizales - Caldas - Colombia

VOL. 63

ENERO - JUNIO 2012

No. 1

CONTENIDO

- ACUMULACIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN LOS FRUTOS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.).** Siavosh Sadeghian Khalajabadi; Beatriz Mejía Muñoz; Hernán González Osorio7
- ANÁLISIS DE LÍPIDOS Y ÁCIDOS GRASOS EN CAFÉ VERDE DE LÍNEAS AVANZADAS DE *Coffea arabica* CULTIVADAS EN COLOMBIA.** Diana Villarreal-Peña; Lina María Baena-Clavijo; Huver Elías Posada-Suárez19
- AVIFAUNA DE LA RESERVA DE PLANALTO.** Jorge Eduardo Botero-Echeverri; Néstor Gustavo Franco-Rojas; Rocío Espinosa-Aldana; Andrés Mauricio López-López41
- ESTIMACIÓN DE VALORES FALTANTES EN SERIES HISTÓRICAS DE BRILLO SOLAR.** Rubén Darío Medina-Rivera; Esther Cecilia Montoya-Restrepo; Álvaro Jaramillo-Robledo57
- EVALUACIÓN DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS Y CALIDAD DE AGUA EN QUEBRADAS DE FINCAS CAFETERAS DE CUNDINAMARCA Y SANTANDER, COLOMBIA.** Luz Ángela Galindo-Leva; Luis Miguel Constantino-Chuaire; Pablo Benavides-Machado; Esther Cecilia Montoya-Restrepo; Nelson Rodríguez -Valencia70
- INTERCAMBIO GASEOSO EN *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* Y *Pachira quinata* EN COLOMBIA.** Angela María Castaño Marín; Héctor Alberto Chica Ramírez; Diego Obando Borilla; Néstor Miguel Riaño Herrera93
- LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA A PARTIR DE DIFERENTES FUENTES FERTILIZANTES.** Hernán González Osorio; Siavosh Sadeghian Khalajabadi111
- MÉTODO PARA IDENTIFICAR EL MOMENTO FINAL DE LA FERMENTACIÓN DE MUCÍLAGO DE CAFÉ.** Aída Esther Peñuela Martínez; Juan Rodrigo Sanz Uribe; Jenny Paola Pabón-Usaquén120
- VOLATILIZACIÓN DEL NITRÓGENO A PARTIR DE DIFERENTES FUENTES FERTILIZANTES EN LA ETAPA DE CRECIMIENTO VEGETATIVO DEL CAFÉ.** Hernán González Osorio; Siavosh Sadeghian Khalajabadi132

COMITÉ EDITORIAL

Fernando Gast H.	Ph.D. Director, Cenicafé
Pablo Benavides M.	Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé
Juan Carlos Herrera P.PhD.	Biólogo. Mejoramiento Genético, Cenicafé
Marco A. Cristancho A.	PhD. Microbiólogo. Fitopatología, Cenicafé
Juan Rodrigo Sanz U.	PhD. Ing. Agrícola. Ingeniería Agrícola, Cenicafé
Víctor Hugo Ramírez B.	MSc. Ing. Agrónomo. Fitotecnia, Cenicafé
Sandra Milena Marín L.	MSc. Ing. Agrónomo. Divulgación y Transferencia, Cenicafé

EDITORES ESPECIALIZADOS DE LA REVISTA 63 (1)

Juan Carlos Herrera P.	PhD. Cenicafé, Federación Nacional de Cafeteros (FNC)
Luis Fernando Gómez G	PhD. Ing. Agrónomo, Corpoica
Marco A. Cristancho A.	PhD. Cenicafé, FNC
José Ricardo Acuña Z.	PhD. Cenicafé, FNC
Víctor Hugo Ramírez B.	MSc. Cenicafé, FNC
Luis Fernando Salazar G.	MSc. Cenicafé, FNC

AGRADECIMIENTO A REVISORES

El éxito de la Revista CENICAFÉ se basa en la calidad de los artículos escritos por los autores y el cuidado y la competencia con que se revisan. Es política editorial de la Revista, solicitar la revisión de los manuscritos a los especialistas más calificados de nuestro país. En adición a los editores, los profesionales mencionados a continuación, han provisto una crítica constructiva de uno o más manuscritos incluidos en la presente edición. Sus nombres son publicados aquí en reconocimiento a su contribución a la Revista.

REVISORES

Alveriro Salamanca J.	Candidato, PhD. Cenicafé, FNC.
Liliana Serna C.	PhD. Universidad Nacional Sede Palmira
Flavio Humberto Moreno H.	PhD. Universidad Nacional Sede Medellín
Luis Fernando Gómez G.	PhD. Ing. Agrónomo, Corpoica
Lena Prieto C.	MSc. Universidad de la Salle
Jennifer Dorado D.	MSc. Universidad Nacional sede Bogotá
Carlos Andrés Pinzón C	MSc. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM
Juan Felipe Rivera H.	MSc. Universidad de la Salle
Clara Inés Medina C.	MSc. Corpoica
Miguel Ángel López M.	MSc. Cenicaña
María Sara Mejía de T.	MSc. Universidad Nacional Sede Palmira
Anaité Carolina Herrera R.	MSc. Gerente de investigación y desarrollo de DISAGRO-Guatemala
Floria Ramírez	MSc. Palma Tica - Costa Rica
Floria Bertsch H.	MSc. Universidad de Costa Rica.
Alma Henao T.	Bibliotecóloga. Cenicafé, FNC
Olga Umaña C.	MA. Traducción. Lic. en Lenguas Modernas

ACUMULACIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN LOS FRUTOS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.)

Siavosh Sadeghian Khalajabadi*; Beatriz Mejía Muñoz*; Hernán González Osorio*

RESUMEN

SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; GONZÁLEZ O., HERNÁN. Acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en los frutos de café (*Coffea arabica* L.). Revista Cenicafé 63 (1): 7-18. 2012

En los estudios de la nutrición vegetal reviste importancia la extracción de nutrientes por la planta en cada una de sus etapas de desarrollo. Durante los meses de abril y noviembre de 2010 se evaluó la acumulación de nitrógeno-N, fósforo-P y potasio-K en los frutos de café (*Coffea arabica* L.) Variedad Castillo® en las Estaciones Experimentales de Cenicafé: Naranjal (Chinchiná, Caldas), El Rosario (Venecia, Antioquia), Líbano (Líbano, Tolima) y Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar). En cada sitio se identificó el día pico de la floración y, a partir de éste se tomaron mensualmente muestras de frutos y hojas en las ramas productivas de 100 plantas, para luego analizar su composición química. El crecimiento de los frutos presentó variaciones entre localidades, siendo un patrón común el modelo sigmoidal doble. Durante el período del desarrollo de los frutos los contenidos de P fueron menores a los de N y K (11,5 y 14,0 veces, respectivamente), y los de K más altos que los de N, especialmente a partir de 90 ó 120 días después del día pico de la floración-DDPF. La cantidad acumulada de nutrientes en los frutos varió entre sitios. En promedio, durante los primeros 60 a 90 DDPF se acumuló el 13%, entre los 60 y 180 días el 62% y en los últimos 2 meses previos a la cosecha el 25%. Las concentraciones de N y P en las hojas presentaron variaciones a través de tiempo, sin que hubiera una relación con respecto al crecimiento de los frutos; en contraste, el K tendió a reducirse.

Palabras clave: Variedad Castillo®, re-movilización de nutrientes, peso del fruto, curva de crecimiento.

ABSTRACT

Nutrient extraction in each plant development stage is important in plant nutrition studies. The accumulation of nitrogen-N, phosphorus-P, and potassium-K was evaluated during the months of April and November 2010 in the fruits of coffee (*Coffea arabica* L.) Castillo® Variety in the Experimental Stations of Cenicafé: Naranjal (Chinchiná Caldas), El Rosario (Venecia, Antioquia), Líbano (Líbano, Tolima) and Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar). In each Station, the full bloom day was identified and, having that as a reference, monthly samples of fruits and leaves in the productive branches of 100 plants were taken to subsequently analyze their chemical composition. The fruit growth rates varied among sites and showed a double sigmoid model as a common pattern. During the period of fruit development, P contents were lower than those of N and K (11.5 and 14.0 times, respectively), and K contents were higher than those of N, especially after 90 or 120 days after full bloom-DAFB. The amount of nutrients accumulated in fruits varied among sites. On average, during the first 60 to 90 DAFB 13% of nutrients was accumulated, between 60 and 180 days it was 62%, and in the last 2 months prior to harvest it was 25%. Concentrations of N and P in the leaves showed variations through time, with no relationship to fruit growth. In contrast, K tended to decrease.

Keywords: Castillo® Variety, remobilization of nutrients, fruit weight, growth curve.

* Investigador Científico II, Asistente de Investigación e Investigador Científico I, respectivamente, Disciplina de Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

Uno de los aspectos importantes en los estudios de la nutrición vegetal se relaciona con la extracción de nutrientes por la planta durante las diferentes etapas del desarrollo del cultivo. Esta información, junto con los resultados sobre la respuesta a la fertilización, permite ajustar los planes de manejo y reducir los riesgos económicos y ambientales.

De acuerdo con Riaño *et al.* (11), en plantas de café variedad Colombia la acumulación de los nutrientes durante la primera etapa de crecimiento vegetativo es lenta, pero luego se incrementa, hasta alcanzar los siguientes valores 2.000 días después de la siembra: Nitrógeno–N 547 kg.ha⁻¹, fósforo–P 51 kg.ha⁻¹, potasio–K 508 kg.ha⁻¹, calcio–Ca 234 kg.ha⁻¹ y magnesio–Mg entre 59 y 117 kg.ha⁻¹.

Parte de las cantidades mencionadas está contenida en los frutos y, por lo tanto, es la que se remueve del lote; el resto retorna al suelo en forma de hojas, ramas, raíces y flores a través de tiempo. Sadeghian *et al.* (12) encontraron que la concentración de nutrientes en los frutos de café en madurez de cosecha puede presentar ligeras variaciones entre sitios; en promedio la cantidad de macronutrientes removidos por 1.000 kg de café almendra, equivalentes a 1.250 kg de café pergamino seco (100 arrobas) representa: 30,9 kg de N, 2,3 kg de P, 36,9 kg de K, 4,3 kg de Ca, 2,3 kg de Mg y 1,2 kg de S. La exportación de los micronutrientes corresponde a: 107 g de hierro–Fe, 61 g de manganeso–Mn, 50 g de boro–B, 33 g de cobre–Cu y 18 g de cinc–Zn.

La demanda de nutrientes por las plantas de café no varía en virtud de la producción (4, 11); esto se debe al hecho que ante una baja fructificación, el crecimiento de las ramas plagiotrópicas y la formación de nuevas hojas y ramas reemplazan a los frutos como vertedero de carbohidratos y nutrientes (8).

Una fracción considerable de los nutrientes acumulados en el fruto proviene de las reservas contenidas en las hojas más próximas a ellos, sin descartar los aportes del suelo y de la re–movilización de los nutrientes desde otras partes de la planta (15). La caída de las hojas durante el proceso de la maduración de la cosecha, se debe principalmente a la gran movilización de los nutrientes hacia los frutos, fenómeno que reduce su concentración en el tejido foliar. Por esta razón, en muchas ocasiones durante los años de alta producción ocurre una mayor caída de las hojas, disminuyendo así la cosecha en el siguiente ciclo (3); fenómeno conocido como bienalidad.

Como es de esperarse, a medida que crecen los frutos, extraen y acumulan más nutrientes en su biomasa. De acuerdo con Salazar *et al.* (13), el crecimiento de los frutos de café variedad Colombia presenta una curva de tipo sigmoideal con tres períodos, una etapa logarítmica desde la floración hasta los 60 días, otra exponencial hasta los 180 días y, finalmente, una de estabilización, hasta llegar a la madurez completa a los 240 días. Según Laviola *et al.* (6) y Ramírez *et al.* (10), la formación del fruto de café se ajusta a un modelo sigmoideal doble, el cual, de acuerdo con Cannel (1971) y Rena *et al.* (2001), citados por Laviola *et al.* (6), comprende cinco estados: “garrapata”, expansión rápida, crecimiento suspendido, llenado y maduración.

Las curvas de acumulación de los nutrientes por los frutos de café han sido empleadas para sugerir épocas de fertilización (5, 6, 10); a veces sin considerar la demanda que tienen las plantas antes de iniciar la fructificación, por ejemplo, para la formación de nudos y flores. En razón de ello, Malavolta *et al.* (8) sugieren iniciar la fertilización en épocas previas a la floración.

El objetivo de este trabajo fue determinar la acumulación de N, P y K durante el desarrollo de los frutos de café y las variaciones de sus concentraciones en las hojas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La fase de campo de la investigación se llevó a cabo entre los meses de abril y noviembre de 2010, en las siguientes Estaciones Experimentales del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé: Naranjal (Chinchiná, Caldas), El Rosario (Venecia, Antioquia), Líbano (Líbano, Tolima) y Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar). En cada sitio se seleccionó un lote de café Variedad Castillo® en buen estado fitosanitario, sembrado o renovado por zoca entre los años 2006 y 2007 (segundo o tercer año de cosecha) con densidades entre 5.000 y 10.000 plantas por hectárea. En Pueblo Bello, la plantación se encontraba bajo sombrero regulado, en tanto que las demás plantaciones estaban a plena exposición solar. Se tomaron muestras de suelo (Tabla 1) y se registró la precipitación desde el inicio de floraciones hasta el final de la cosecha (Tabla 2). El suministro de nutrientes se realizó en dos ocasiones, durante los meses de marzo-abril

y septiembre-octubre (Tabla 3), basado en los análisis de suelos realizados previos a la inicio del trabajo.

En cada localidad se identificó el día pico de la floración y, a partir de esta fecha, se tomaron mensualmente muestras de frutos y de hojas en las ramas productivas de 100 plantas, que se seleccionaron de manera aleatoria al iniciar la investigación. El número de frutos recolectados por planta varió en cada muestreo, así: 40 en el primero, 20 en el segundo, 10 en el tercero y 4 entre cuarto y octavo muestreos. En cada oportunidad se determinó el peso individual de 50 frutos y el contenido de humedad a 105°C. Tanto los frutos como las hojas (tercero o cuarto par, contadas a partir del ápice) se secaron durante 48 y 120 horas, respectivamente, en estufa a 70°C y se analizaron sus concentraciones de N, P y K, de acuerdo con la metodología descrita por Carrillo *et al.* (2).

Con base en el peso seco y la concentración de N, P y K en los frutos se calculó la extracción y la acumulación relativa de estos nutrientes en cada una de las épocas de muestreo.

Tabla 1. Propiedades de los suelos en los lotes experimentales, evaluadas en agosto de 2010.

	Estación Experimental			
	Naranjal	Líbano	El Rosario	Pueblo Bello
pH	4,90	5,00	4,40	4,40
Materia orgánica (%)	14,9	18,50	12,10	9,70
K (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,23	0,41	0,75	0,45
Ca (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	2,62	1,30	0,40	2,21
Mg (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,66	0,39	0,44	0,59
Al (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,00	1,80	6,60	2,50
P (mg.kg ⁻¹)	6,00	6,00	46,00	11,00
S (mg.kg ⁻¹)	18,00	4,00	8,00	44,00
Textura	Franca	Franca	Arcillosa	Arcillosa

Para explicar el crecimiento de los frutos en función del tiempo se utilizaron los modelos de regresión no-lineares

sigmoidales con tres y cuatro parámetros, de acuerdo a lo sugerido por Laviola *et al.* (5) (Ecuación <1>)

$$\hat{y} = \frac{a}{1 + \exp\left(-\left(\frac{x - x_0}{b}\right)\right)}, \quad \hat{y} = y_0 + \frac{a}{1 + \exp\left(-\left(\frac{x - x_0}{b}\right)\right)} \quad \text{Ecuación <<1>>}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación. El año 2010 se caracterizó por altas precipitaciones (Tabla 2), especialmente durante el período del crecimiento y desarrollo de los frutos –marzo a noviembre de 2010– y, en razón de ello, la falta de humedad no fue un limitante. Para estos 8 meses se registraron las siguientes cantidades de lluvia: Líbano 2.308 mm, Pueblo Bello 2.705 mm, Naranjal 3.203 mm y El Rosario 3.356 mm.

Contenido de humedad en el fruto. El valor más bajo del contenido de la humedad en los frutos frescos se detectó a los 210 días después del día pico de la floración (DDPF) en Naranjal (65,3%), y el más alto a los 60 DDPF en Pueblo Bello (87,9%) (Figura

1). En todas las localidades, 30 DDPF los frutos contenían en promedio 78,1% de humedad; valor que se incrementó hasta 86,1% a los 60 días, para luego comenzar a descender, hasta alcanzar promedios entre 67,1% y 71,5% un mes antes de la cosecha. Aunque el rango detectado se acerca a los reportados por Salazar *et al.* (13) para variedad Colombia en la Estación Central Naranjal (entre 68,2% y 84,3%), el comportamiento de las variaciones difiere, pues de acuerdo a lo hallado por estos autores la humedad de los frutos aumenta gradualmente hasta los 120 días, en tanto que después tiende a disminuir. En promedio, Naranjal presentó los porcentajes más bajos (74,6%), seguido por Líbano (76,8%), Pueblo Bello (77,8%) y El Rosario (78%), siendo las tendencias en las cuatro localidades similares.

Tabla 2. Precipitación mensual entre marzo y noviembre de 2010, en las estaciones experimentales de Cenicafé.

Estación	Mes									
	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
Naranjal	125	181	202	391	321	538	311	380	311	443
Líbano	60	72	192	342	311	376	155	260	253	287
Pueblo Bello	125	160	249	349	415	236	427	331	200	213
El Rosario	73	172	197	264	517	324	442	534	264	569

Tabla 3. Nutrientes suministrados durante el año 2010* en los lotes experimentales.

Estación	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
	(kg.ha-año ⁻¹)			
Naranjal	280	60	260	0
Líbano	240	40	180	12
Pueblo Bello	120	40	130	15
El Rosario	260	20	180	12

* Marzo y septiembre en El Rosario y Líbano y, abril y septiembre en Naranjal y Pueblo Bello.

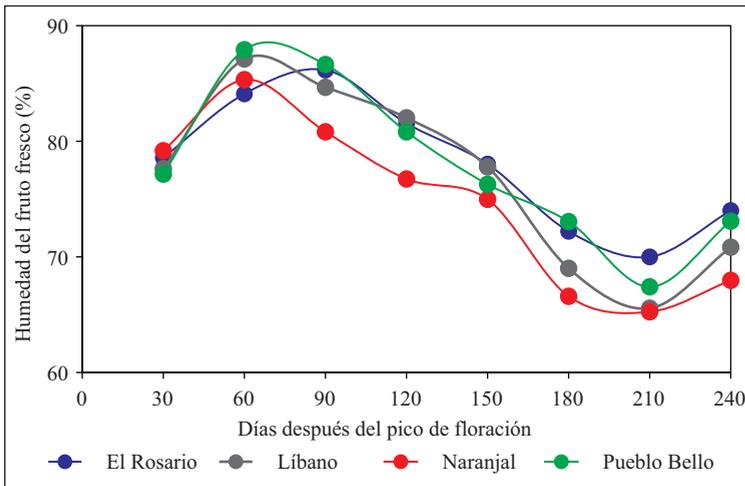


Figura 1. Contenido de humedad en el fruto de café en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Crecimiento del fruto. El crecimiento de los frutos, expresado en términos de peso fresco, presentó algunas variaciones entre las localidades (Figura 2). En Naranjal y Pueblo Bello fue lento hasta los 60 DDPF, entre esta fecha y los siguientes 30 días tuvo un incremento considerable, de los 90 a los 210 días se mantuvo relativamente constante, para terminar en el último mes con un aumento leve.

En El Rosario la fase de crecimiento lento se prolongó hasta los 90 días, en el siguiente mes se presentó un crecimiento más acelerado y, a partir de este momento y hasta el último día exhibió un aumento progresivo.

El comportamiento registrado en Líbano fue similar al de El Rosario, con la diferencia que en esta localidad el crecimiento inicial fue más sostenido hasta los 90 DDPF.

Los cambios en la biomasa de los frutos en función del tiempo se ajustaron al modelo sigmoideal doble, como también lo evidencian Ramírez *et al.* (10) y Laviola *et al.* (6); en este sentido, la diferencia entre los parámetros

de las ecuaciones obtenidas corroboran que el patrón de las curvas varió según la localidad (Tabla 4).

En el momento de la cosecha, es decir 240 DDPF, se presentaron los siguientes valores para el peso fresco y seco de los frutos, respectivamente: El Rosario 2,659 y 0,691 g, Líbano 2,282 y 0,665 g, Naranjal 1,910 y 0,612 g, y Pueblo Bello 1,829 y 0,492 g. Las anteriores diferencias pueden asociarse tanto al ambiente (suelo y clima) y manejo (principalmente sombrero y fertilización), como al material genético (las líneas que componen la variedad regional); en este sentido, cabe resaltar que el tamaño del grano constituye uno de los componentes de la productividad. En promedio, el peso fresco de los frutos durante las ocho oportunidades de evaluación presentó un coeficiente de variación entre 8% y 9%.

Los valores hallados para el peso seco fueron mayores a los reportados por Laviola *et al.* (6), Ramírez *et al.* (10) y Salazar *et al.* (13), observados para variedades Caturra y Colombia. Aunque parte de lo anterior

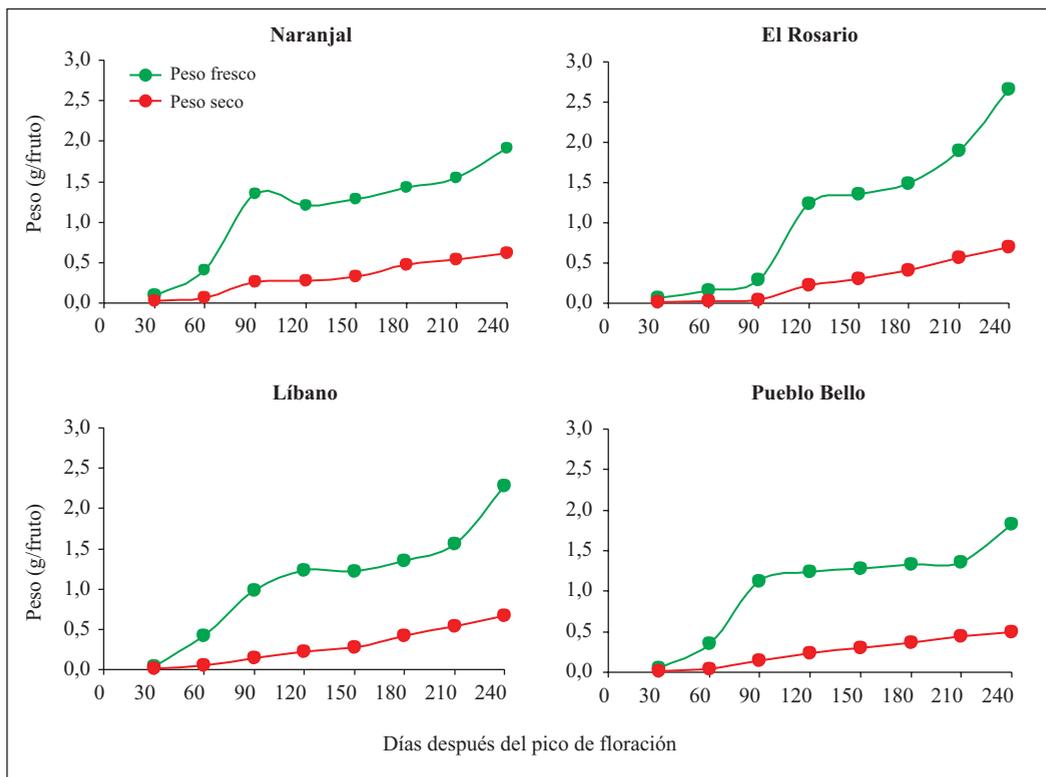


Figura 2. Peso fresco y seco de un fruto de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Tabla 4. Ecuaciones de regresión del peso fresco del fruto de café en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación	Período (DDPF)	Modelo	R ² (%)
Naranjal	30 a 150	$y=1,280/(1+\exp(-(x-60,990)/1,310))$	98,4
	120 a 240	$y=1,129+269,900/(1+\exp(-(x-563,300)/55,230))$	99,3
Libano	30 a 150	$y=1,237/(1+\exp(-(x-70,126)/14,146))$	99,8
	120 a 240	$y=1,204+121,900/(1+\exp(-(x-370,100)/27,550))$	99,9
Pueblo Bello	30 a 150	$y=1,265/(1+\exp(-(x-60,990)/10,313))$	99,9
	120 a 240	$y=1,270+206,800/(1+\exp(-(x-345,90)/17,91))$	98,5
El Rosario	30 a 150	$y=1,379/(1+\exp(-(x-101,084)/9,068))$	98,4
	120 a 240	$y=1,209+5,573/(1+\exp(-(x-274,049)/32,596))$	99,9

puede relacionarse con la influencia del ambiente, tiene un peso considerable el componente genético, dado que una de las estrategias para incrementar la productividad en la Variedad Castillo® en los programas del mejoramiento genético ha sido la ganancia en el peso del grano (1).

Concentración de nutrientes en los frutos.

Conforme avanzó el crecimiento del fruto a través de tiempo, disminuyeron las concentraciones de N, P y K en este órgano (Figura 3), comportamiento que se asoció al efecto de la dilución de los elementos, en respuesta al desarrollo del fruto, como lo confirman Chaves y Sarruge (3) y Souza *et al.* (14).

En promedio, para las cuatro localidades, la concentración de N pasó de 3,28% al 1,41%, el P de 0,36% al 0,12% y K de 2,61% al 1,88%. Para el N y P las mayores reducciones tuvieron lugar durante los primeros 150 DDPF, en tanto que para el K ocurrieron a los 210 DDPF (63%). Las diferencias más marcadas entre las localidades fueron detectadas durante los primeros 90 DDPF, caracterizándose El Rosario y Pueblo Bello por sus mayores valores en los tres elementos objeto de estudio. Parte de las anteriores diferencias se relacionan con la fertilidad del suelo; por ejemplo, las concentraciones más bajas de K y P en Naranjal estarían asociadas con sus tenores en el suelo (Tabla 1). Por último, cabe resaltar que al momento de la cosecha (240 DDPF) el K fue el elemento predominante en el fruto, seguido por el N y P. Los valores de K y N resultaron menores a los reportados por Sadeghian *et al.* (12) para dos localidades de la zona cafetera del país (N 1,23%-1,46% y K 2,15%-2,26%), en tanto que los de P son similares (0,11%-0,12%).

Acumulación de N, P y K en el fruto.

Como era de esperarse, la acumulación de

N, P y K en el fruto (Figura 4) presentó una tendencia relativamente similar a la observada para la biomasa fresca y seca (Figura 2). Los contenidos de P durante todo el período del desarrollo del fruto fueron menores a los de N y K (en promedio 11,5 y 14,0 veces, respectivamente), y los de K se caracterizaron por ser cada vez más altos que los de N, particularmente a partir de 90 ó 120 DDPF.

En la Tabla 5 se consignan los valores correspondientes a las cantidades acumuladas de N, P y K en el fruto de café 240 DDPF, es decir, al momento de la cosecha. Se presentaron las siguientes secuencias para los tres elementos en las cuatro Estaciones:

N: El Rosario>Naranjal>Pueblo Bello>Líbano

P: Líbano>El Rosario>Naranjal>Pueblo Bello

K: El Rosario>Líbano>Naranjal>Pueblo Bello

Tabla 5. Cantidad acumulada de N, P y K en el fruto de café 240 días después del día pico de la floración, para cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Estación	Cantidad acumulada de nutriente (mg/fruto)		
	N	P	K
El Rosario	9,61	0,76	12,78
Líbano	7,78	0,87	12,71
Naranjal	8,63	0,67	11,14
Pueblo Bello	8,12	0,54	9,45

Acumulación relativa de N, P y K en el fruto.

Al expresar la acumulación de N, P y K en los frutos de café en términos relativos –es decir que se toma como punto de referencia el 100% de lo asimilado– es posible identificar algunas tendencias (Figura 5). Para el conjunto de los tres nutrientes se puede afirmar que: i) La acumulación relativa durante los primeros 60 a 90 DDPF representó sólo el 13%; ii) A partir de los

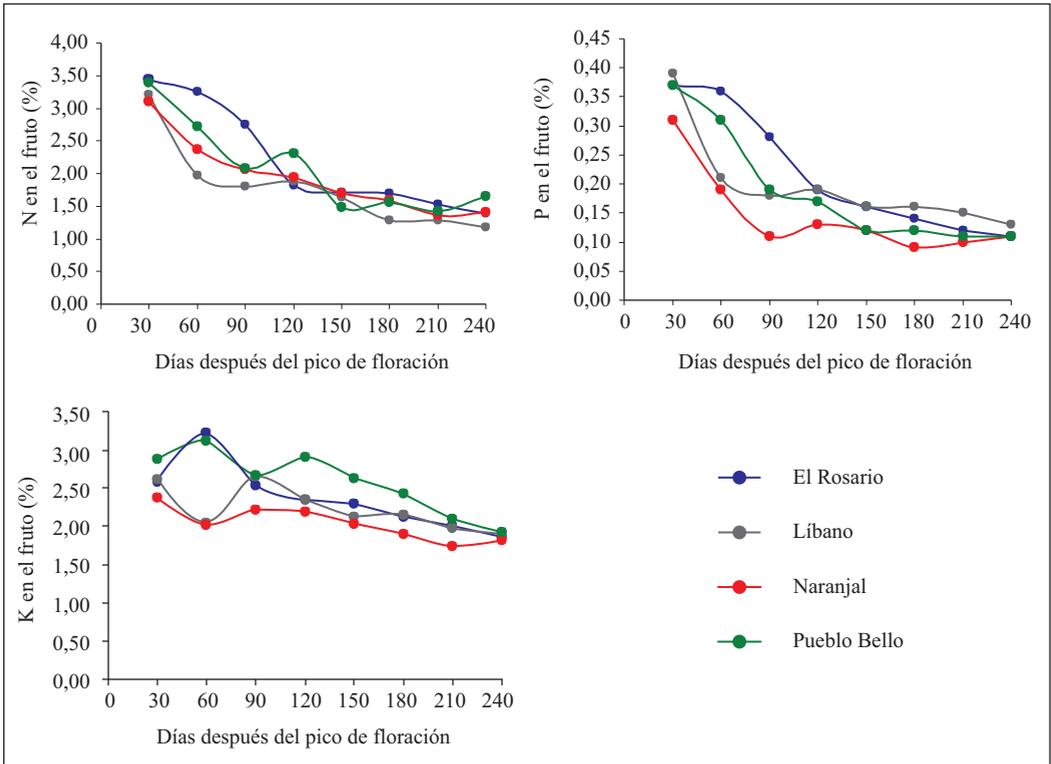


Figura 3. Concentración de N, P y K en los frutos de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

60 ó 90 días, y hasta los 180 DDPF, en promedio los frutos acumularon el 62% de estos elementos; y iii) En los últimos 2 meses previos a la cosecha acumuló el 25%.

Los resultados obtenidos por Chaves y Sarruge (3) para la variedad Catuaí amarillo, indican que a los 5 meses después del inicio de la formación del fruto se ha absorbido el 88% de N, 89% de P y 82% de K.

Ramírez *et al.* (10) hallaron que para la variedad Caturra el 50% de los requerimientos totales de nutrientes, a excepción de K, son “consumidos” por el fruto durante los primeros 90 días. Esta condición concuerda con lo hallado para Naranjal y Pueblo Bello, en

tanto que para El Rosario y Líbano ocurrió a los 120 días. En estas dos últimas Estaciones el comportamiento de la acumulación de los tres macronutrientes a través de tiempo fue relativamente similar, no así para las otras dos localidades. En Naranjal la toma de N y K por el fruto presentó una tendencia diferente a la de P en algunas épocas y, en Pueblo Bello una situación parecida ocurrió después de los 120 días para N y P con respecto a K.

Mientras que en Líbano y El Rosario la cantidad acumulada de K en los últimos 2 meses antes de la cosecha representó el 30% y 32% del total, respectivamente, en Naranjal y Pueblo Bello los frutos ya se

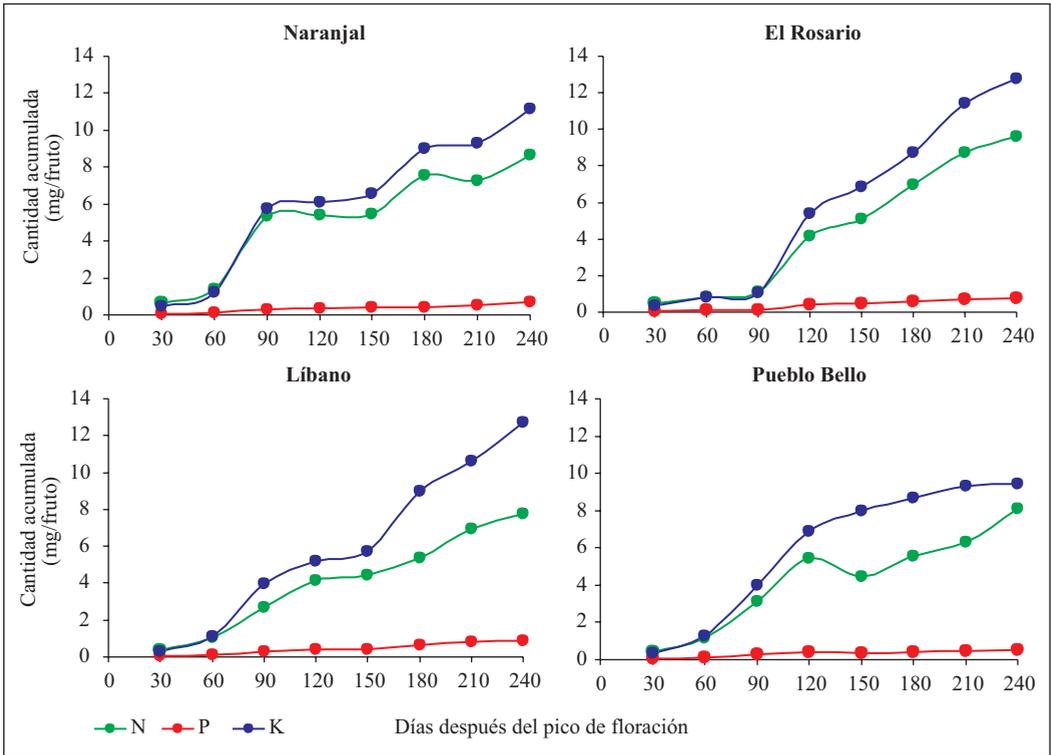


Figura 4. Cantidad acumulada de N, P y K en el fruto de café en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

habían tomado antes de esta fecha el 82% y el 92% de este elemento.

Los resultados expuestos revelan que pese a cierta similitud, la acumulación de los nutrientes puede variar entre sitios, dependiendo de las condiciones predominantes. Los estudios desarrollados por Laviola *et al.* (5, 6) confirman lo expuesto, al demostrar que la acumulación de macronutrientes cambia de acuerdo a la temperatura, factor climático afectado por la altitud.

Concentración foliar de nutrientes. Aunque la concentración de N y P en las hojas presentaron algunas variaciones a través de

tiempo (Figura 6), no hubo una relación entre los cambios detectados y el avance en el crecimiento y desarrollo del fruto; en contraste, el K tendió a reducirse. Este resultado puede justificarse, en parte, debido a la mayor demanda de K por los frutos y a la forma que se encuentra en los tejidos, pues éste no forma compuestos y, por lo tanto, permanece como ión libre, lo que facilita su movilización (9). Lo anterior también revela que durante la formación del fruto existe una mayor re--movilización de K con respecto a N y P desde los tejidos foliares más nuevos.

En el trabajo desarrollado por Laviola *et al.* (6), no se encontraron evidencias claras

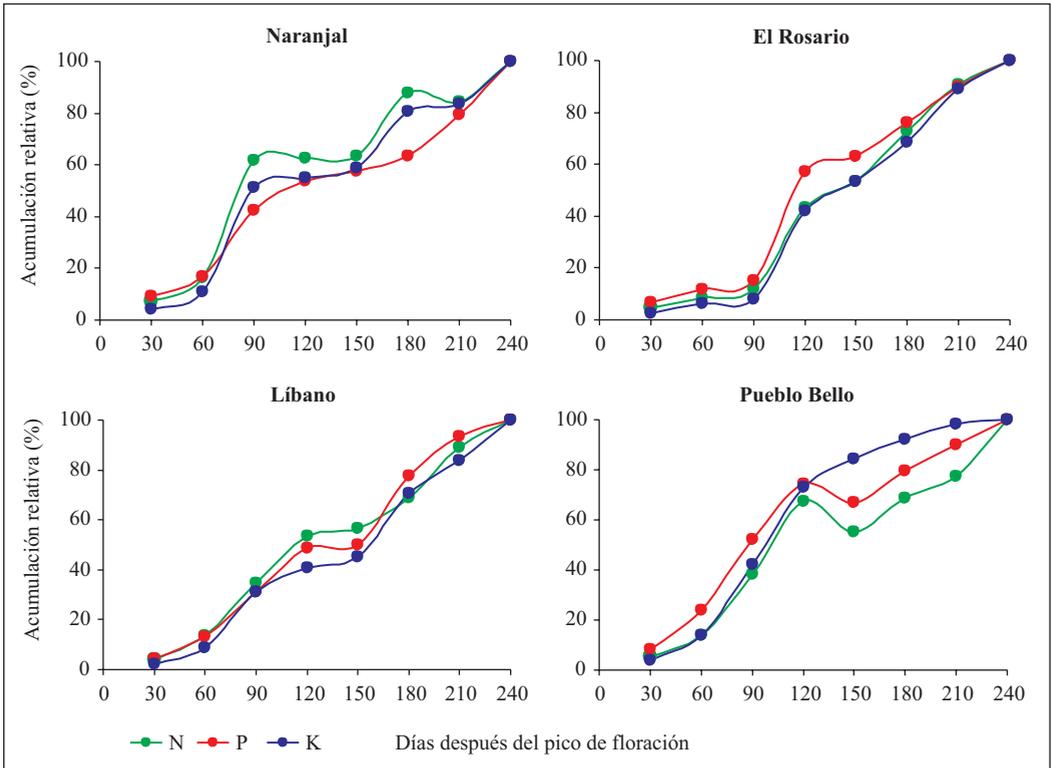


Figura 5. Acumulación relativa de N, P y K en el fruto de café a través del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

que pudieran justificar la re--movilización de N, P y K desde las hojas, mientras que Chaves y Sarruge (3) demostraron la relación entre estos nutrientes en la fuente (hoja) y en el vertedero (frutos). En este mismo sentido, Lima Filho y Malavolta (7) hallaron que en plantas sin deficiencias nutricionales, entre 47% a 58% de N y de 54% a 64% de K exportado por los frutos proviene de las hojas.

La concentración foliar de P presentó diferencias considerables entre las localidades y no fue sensible a su aplicación vía abonamiento. Durante todo el período de evaluación, las concentraciones foliares de P fueron mayores en Líbano, seguidas en su orden

por El Rosario, Naranjal y Pueblo Bello, comportamiento que no fue sustentado en su totalidad por los niveles en el suelo ni por el suministro realizado.

Las variaciones de N fueron relativamente pocas, pero reflejan el efecto de la aplicación de los fertilizantes, en especial para el primer semestre del año. Naranjal presentó las concentraciones más altas y Pueblo Bello las más bajas, respuesta que estaría relacionada con las diferencias en los contenidos de la materia orgánica (Tabla 1) y el N aplicado (Tabla 3).

Durante el período que tardó el fruto para alcanzar la madurez de cosecha, la

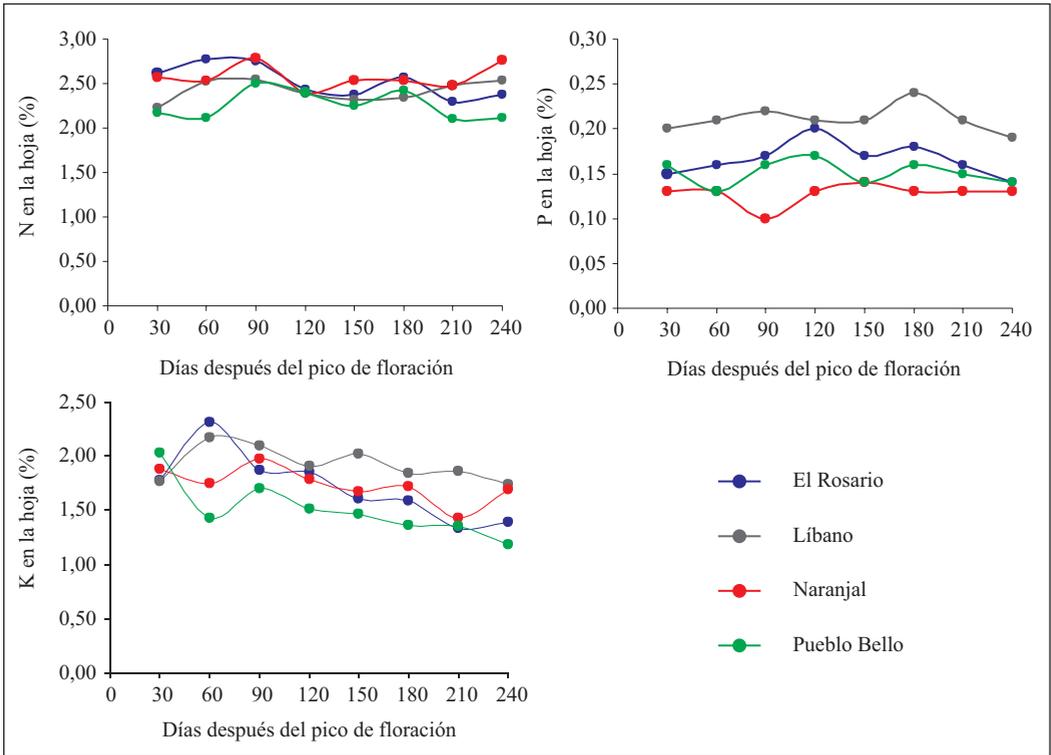


Figura 6. Concentración foliar de N, P y K en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé.

concentración foliar de K disminuyó en promedio 0,38%, al pasar de 1,87% a 1,49%. Para Pueblo Bello y El Rosario esta reducción fue mayor que las otras dos Estaciones Experimentales. El efecto de la primera aplicación de K, realizado para El Rosario y Líbano en el mes de marzo y para Naranjal y Pueblo Bello en abril, se reflejó un mes más tarde.

Los resultados obtenidos permiten concluir que:

- El peso de un fruto de café Variedad Castillo® y la cantidad de nutrientes que éste acumula pueden variar según la localidad. Pese a lo anterior, en todos

los sitios el potasio se caracterizó por ser el elemento predominante, seguido por nitrógeno, y éste frente al fósforo.

- La mayor acumulación de nutrientes en los frutos (alrededor del 62%) ocurre entre los 60 y 180 días después de la floración y, en los 2 meses antes de la cosecha, se acumulan cerca del 25%.
- La concentración foliar de potasio, evaluada en el tercero o cuarto par de hojas, disminuyó en conformidad al crecimiento de los frutos, indicando una removilización de este elemento desde los tejidos relativamente más nuevos; tendencia que no se detectó de manera clara para nitrógeno y fósforo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los ingenieros Juan Carlos García López, John Wilson Mejía Montoya, José Raúl Rendón Sáenz, Jorge Camilo Torres Navarro y José Enrique Baute Balcazar, así como a Lady Juliet Vargas Gutiérrez y Diego Alejandro Arcila Vasco.

LITERATURA CITADA

1. ALVARADO A., G.; POSADA S., H.E.; CORTINA G., H.A. Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. Chinchiná: CENICAFÉ, 2005. 8 p. (Avances Técnicos No. 337).
2. CARRILLO P., I.F.; MEJÍA M., B.; FRANCO A., H.F. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná: CENICAFÉ, 1994. 52 p.
3. CHAVES, J.C.D.; SARRUGE, J.R. Alterações nas concentrações de macronutrientes nos frutos e folhas do cafeeiro durante um ciclo produtivo. Pesquisa agropecuaria brasileira 19(4):427-432. 1984.
4. CORRÊA, J.B.; GARCÍA, A.W.R.; COSTA, P.C. DA. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuai. p. 35-41. En: CONGRESSO Brasileiro de pesquisas cafeeiras. (13 : Dezembro 2-5 1986 : São Lourenço). Rio de Janeiro : Ministério da indústria e do comércio : Instituto brasileiro do café, 1986.
5. LAVIOLA, B.G.; MARTÍNEZ H., E.P.; SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em em quatro altitudes de cultivo: Cálcio, magnésio e enxofre. Revista brasileira de ciência do solo 31:1451-1462. 2007.
6. LAVIOLA, B.G.; MARTÍNEZ H., E.P.; SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA, S.M.; ROSADO, L. Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. Bioscience journal 24(1):19-31. 2008.
7. LIMA F., O.F. DE; MALAVOLTA, E. Studies on mineral nutrition of the coffee plant (Coffea arabica L. cv. Catuai vermelho): Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. Brazilian journal of biology 63(3):481-490. 2003.
8. MALAVOLTA, E.; FAVARIN, J.L.; MALAVOLTA, M.; CABRAL, C.P.; HEINRICH, R.; SILVEIRA, J.S.M. Repartição de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. Pesquisa agropecuaria brasileira 37(7):1017-1022. 2002.
9. MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Principios de nutrición vegetal. Basel : Internacional potash institute, 2000. 692 p.
10. RAMÍREZ, F.; BERTSCH, F.; MORA, L. Consumo de nutrimentos por los frutos y bandolas de café Caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en Aquiares, Turrialba, Costa Rica. Agronomía costarricense 26(1):33-42. 2002.
11. RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por Coffea arabica L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. Cenicafé 55(4):265-276. 2004.
12. SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; ARCILA P., J. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. Cenicafé 57(4):251-261. 2006.
13. SALAZAR G., M.R.; CHAVES C., B.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Crecimiento del fruto de café Coffea arabica var. Colombia. Cenicafé 45(2):41-50. 1994.
14. SOUZA, V.H. DA S.; MAESTRI, M.; BRAGA, J.M.; CHAVES, J.R.P. Variações no teor de alguns elementos minerais nas folhas e frutos de café Coffea arabica L. Var. Mundo novo. CERES 22(123):318-331. 1975.
15. VALARINI, V.; BATAGLIA, O.C.; FAZUOLI, L.C. Macronutrientes em folhas e frutos de cultivares de café arábica de porte baixo. Bragantia 64 (4):661-672. 2005.

ANÁLISIS DE LÍPIDOS Y ÁCIDOS GRASOS EN CAFÉ VERDE DE LÍNEAS AVANZADAS DE *Coffea arabica* CULTIVADAS EN COLOMBIA

Diana Villarreal-Peña*; Lina María Baena-Clavijo*; Huver Elías Posada-Suárez*

RESUMEN

VILLARREAL P., D.; BAENA C., L.M.; POSADA S., H. E. Análisis de lípidos y ácidos grasos en café verde de líneas avanzadas de *Coffea arabica* cultivadas en Colombia. *Cenicafé* 63 (1): 19-40. 2012

El objetivo de este estudio fue analizar la composición lipídica en muestras de café verde de diferentes genotipos de café *Coffea arabica*, con el fin de determinar el efecto del genotipo y de algunas variables climáticas sobre el contenido en lípidos y en ácidos grasos totales. Muestras provenientes de 11 líneas avanzadas derivadas del cruce entre *C. arabica* var. Caturra y el Híbrido de Timor, fueron cosechadas en cinco localidades de la región cafetera colombiana (Naranjal, Paraguaicito, El Rosario, El Tambo y Pueblo Bello), durante el año 2006. Se analizó el contenido en lípidos totales por gravimetría y la composición en ácidos grasos totales mediante cromatografía en fase gaseosa. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre genotipos y entre localidades con respecto al contenido lipídico total, a los ácidos grasos mayoritarios (Linoleico, palmítico, oleico, esteárico, araquídico, linolénico y behénico) así como a diferentes variables lipídicas. Al correlacionar los factores climáticos y las variables lipídicas, se encontró un efecto significativo de la temperatura sobre la composición en ácidos grasos mayoritarios. Los análisis de componentes principales y factorial discriminante permitieron separar las localidades y los genotipos, con base en su composición en ácidos grasos mayoritarios. Los resultados se discuten respecto a su interés potencial en estudios de discriminación quimiométrica de muestras de café y su uso inmediato en la diferenciación del café de Colombia por su origen geográfico.

Palabras clave: Líneas introgresadas, interacción genotipo x localidad, composición lipídica, temperatura, diferenciación, origen geográfico.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the lipid composition in green coffee samples of different *Coffea arabica* coffee genotypes in order to determine the effect of the genotype and of some climatic variables on the lipids content and total fatty acids. Samples from 11 advanced lines derived from a cross between *C. arabica* var. Caturra and Timor Hybrid were harvested at five locations in the Colombian coffee region (Naranjal, Paraguaicito, El Rosario, El Tambo and Pueblo Bello), in 2006. The total lipid content and the total fatty acid composition were determined by gravimetry and by gas chromatography, respectively. The results showed significant differences ($p < 0,0001$) among genotypes and among locations regarding the total lipid content, the major fatty acids (linoleic, palmitic, oleic, stearic, arachidic, linolenic and behenic) as well as different lipid variables. By correlating climatic factors and lipid variables, a significant effect of temperature on the major fatty acids composition was found. The analyses of the principal components and discriminant factorial allowed separating locations and genotypes, based on their composition, into major fatty acids. The results are discussed with respect to their potential interest in chemometric discrimination studies of coffee samples and their immediate use in differentiating Colombian Coffee by its geographical origin.

Keywords: Introgressed lines, genotype x location interaction, lipid composition, temperature, differentiation, geographical origin.

* Investigador Científico I (hasta Diciembre de 2011), Investigador Asociado (hasta Diciembre de 2008) e Investigador Científico III, respectivamente, Disciplina de Mejoramiento Genético. Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La calidad del café es un aspecto muy complejo que depende de numerosos factores entre los que se encuentran: El origen genético (especie o variedad), las condiciones pedo-ecológicas inherentes al cultivo, su manejo agronómico, la recolección de los frutos, su beneficio y todos los demás procesos propios de la cadena final de producción (34).

La composición química del grano de café está determinada no solamente por el componente genético, sino por la interacción entre éste y el medio ambiente en el cual se desarrolla el grano, es decir, de la zona geográfica donde el café es cultivado (31, 34, 46).

Desde hace tiempo ha existido un interés creciente por determinar el origen del café, a partir del conocimiento de sus características químicas y organolépticas. El análisis de los compuestos químicos relacionados directa o indirectamente con la calidad del café, ha sido uno de los métodos más utilizados para verificar la autenticidad del mismo, pero también para discriminar la calidad en taza producida por las dos principales especies, *Coffea arabica* y *C. canephora*, esta última también denominada Robusta (38, 45). Es así como tanto los café Arábicas como los cafés Robustas han podido ser caracterizados con respecto al contenido de minerales (35, 37), sustancias volátiles (17), ácidos clorogénicos (22, 36), aminoácidos (10) y cafeína (9, 31). La fracción lipídica, incluyendo los ácidos grasos (38, 41, 45), esteroides (8, 54), diterpenos (30, 49, 50), tocoferoles y triglicéridos (21), igualmente ha servido como un factor discriminante de la calidad. Los análisis químicos también han sido usados para estudiar el origen geográfico del café. Para ello se cuantifican las fracciones de elementos minerales (1), así como de otros compuestos de importancia mayor para la calidad como son: Lípidos, proteínas, sacarosa,

cafeína, trigonelina, ácidos clorogénicos y ácidos orgánicos. Estos análisis se realizan utilizando técnicas como el NIRS (por *near infrared spectroscopy*), la cual está basada en métodos espectroscópicos (3, 25).

Dentro de todos los compuestos determinantes de la calidad, los lípidos y los ácidos grasos constituyen dos grupos de mayor relevancia. Actualmente se sabe que los lípidos tienen un efecto benéfico sobre el aroma y el sabor de la bebida de café, ya que durante la tostión éstos se concentran en las áreas externas del grano, protegiéndolo de las posibles pérdidas de otros compuestos durante el proceso (43). Es así como los cafés de alta acidez y buena calidad generalmente presentan mayores contenidos de lípidos en el grano (16). Tanto *C. arabica* como *C. canephora*, contienen entre el 7% y el 17% de lípidos totales en sus granos. Los valores reportados en la literatura varían entre 10,5% y 17,7% para el café Arábica y entre 8% y 10% para los Robustas (32, 33, 39, 49). La mayoría de los lípidos, se encuentran en el endospermo de los granos de café verde (62) y sólo una pequeña cantidad se encuentra en la capa externa del grano en forma de cera. Según Folstar (20), la cantidad absoluta de lípidos del grano no se ve afectada por la tostión, mientras que puede aumentar significativamente debido a la pérdida de humedad relativa en éste.

Factores como la especie, las condiciones de cultivo, el método de extracción e incluso el método utilizado para su cuantificación, pueden afectar los valores del contenido total de lípidos. Algunos estudios sugieren que las mayores acumulaciones de lípidos se presentan en cafés de altura o cultivados bajo sombra (2, 4, 16, 23). En tales condiciones, el período de maduración del fruto tiende a ser más prolongado debido a las bajas temperaturas, lo que favorece un mayor desarrollo y llenado

del grano, y en consecuencia, una mayor acumulación de compuestos precursores del aroma (53).

La composición en ácidos grasos presentes en la fracción lipídica del grano de café también ha sido objeto de varias investigaciones (13, 18, 20, 32, 48, 49). Se sabe que una gran porción de estos compuestos se encuentran combinados, una fracción no despreciable está esterificada con el glicerol en los triglicéridos, un 20% están esterificados con los diterpenos (cafestol y kahweol) y sólo un 2% se encuentra como ésteres de esterol. La fracción insaponificable es rica en diterpenos de la familia Kaurano, principalmente Cafestol, Kahweol y 16-O-Metilcafestol, los cuales reciben cada vez más atención debido a sus distintos efectos fisiológicos y a su efecto en la salud humana (7, 11, 12, 40, 52). El 16-O-Metilcafestol ha sido utilizado como un indicador fiable para determinar la presencia de café Robusta en mezclas de café (42, 50). Entre los diferentes esteroides presentes en la porción insaponificable, se han identificado compuestos como los desmetil- metil- y dimetil-esteroides (8).

A pesar del número importante de trabajos desarrollados en este tema, son pocos los reportes en los cuales se ha abordado la relación entre el contenido de lípidos y ácidos grasos con factores externos como la temperatura, la humedad, el brillo solar, o el origen genético del material cultivado (5, 29, 60). Por consiguiente, el objetivo del presente estudio fue investigar la posible influencia que tienen tanto el genotipo como algunas variables climáticas sobre el contenido de lípidos totales y ácidos grasos presentes en granos de café verde de diferentes genotipos de la especie *C. arabica*. Los resultados se discuten a la luz de su interés potencial en estudios de discriminación quimiométrica de muestras de café y su posible utilización

para analizar el origen y diferenciación del café de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal. Se analizaron granos de café verde provenientes de 11 líneas avanzadas (F5) de *C. arabica*, derivadas del programa de mejoramiento genético de Cenicafe y obtenidas a partir del cruce entre la variedad Caturra y el híbrido de Timor CIFC-1343, un genotipo de origen natural resultante del cruzamiento entre *C. arabica* x *C. canephora*. Las muestras de granos de café provenientes de los diferentes genotipos (BGB.1033, BGB.1040, BGB.1076, BGB.1140, BGB.1219, BGB.1253, BGB.1235, BGB.1044, BGB.1285, BGB.1352, BGB.1049) fueron recolectadas en el año 2006, en cinco localidades diferentes (Naranjal, Paraguaicito, El Rosario, El Tambo y Pueblo Bello) en la región cafetera colombiana. Como control se usaron muestras de la variedad Caturra cultivada en las mismas localidades. Las condiciones agro-climatológicas de las cinco localidades analizadas en este estudio se presentan en la Tabla 1.

Las muestras fueron recolectadas durante el pico de la cosecha principal (propio de cada localidad), seleccionando sólo frutos maduros y sanos. Para cada muestra, se benefició 1 kg de frutos por el método húmedo (despulpado, fermentación y secado), para obtener aproximadamente 250 g de café verde. Las muestras de café verde en buen estado fueron tamizadas a través de una malla de 17/64', mientras que los granos defectuosos (por ejemplo, caracoles, vanos, monstruos) fueron descartados.

Almacenamiento y preparación de las muestras. Para cada genotipo, los granos de café pergamino se secaron y almacenaron

Tabla 1. Condiciones agro-climatológicas para cinco localidades de la región cafetera Colombiana. Valores del promedio anual para cada variable en el año 2006 (24).

Localidad	Altitud (m)	Latitud	Longitud	Temperatura (°C)			Brillo solar (h)	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)
				Media	Mín.	Máx.			
Naranjal	1.381	4° 58' N	75° 39' W	21,4	17,3	27,3	136,9	261,4	68,0
Paraguacito	1.203	4° 24' N	75° 44' W	22,1	17,3	28,1	141,3	166,3	77,0
El Rosario	1.635	5° 58' N	75° 42' W	20,4	16,9	25,5	164,6	205,5	68,8
El Tambo	1.735	2° 24' N	76° 44' W	18,8	14,5	24,1	141,6	168,3	76,8
Pueblo Bello	1.134	10° 25' N	73° 34' W	21,1	15,9	27,1	201,9	174,4	85,6

en frascos plásticos dentro de bolsas plásticas cerradas herméticamente al vacío y conservadas en la oscuridad a -20°C. Luego, los granos de café se procesaron hasta obtener café almendra, y estos granos fueron reducidos a polvo fino usando un molino criogénico analítico (Centrifugal Grinding Mill Md Zm100, Retsch/Brink, Alemania). El polvo de café molido fue almacenado en tubos Corning de 50 mL, dentro de bolsas plásticas selladas al vacío y éstas a su vez dentro de cajas plásticas, conteniendo sílica gel, almacenadas a -20°C y en la oscuridad, hasta su utilización en las etapas posteriores.

Determinación del contenido de humedad de las muestras. El contenido de humedad de las muestras fue estimado por el método ISO-6673-2003, después del secado completo de los polvos (0,2 g) en una estufa (Dies, Colombia) a 105°C hasta obtener peso constante (27).

Extracción y determinación de los lípidos totales. Los lípidos totales fueron extraídos a partir de 2 g de muestra de polvo seco, usando el método de Folch (19) modificado con diclorometano en lugar de cloroformo (5, 60), después de la homogeneización por 30 s, en una mezcla de diclorometano:metanol 2:1 (v/v), usando un homogeneizador IKA T25 Ultra-turrax basic (IKA®-WERKE,

Alemania). El contenido en lípidos de los granos fue determinado gravimétricamente después de la evaporación completa del solvente, en un evaporador con flujo de nitrógeno a 40°C (N-EVAP, Organomation, USA), de acuerdo al protocolo establecido. El contenido en lípidos fue medido por triplicado, utilizando un diseño experimental completamente al azar. El contenido en lípidos totales se expresó como porcentaje en base seca (% bs).

Determinación de la composición en ácidos grasos totales. Los ésteres metílicos de ácidos grasos o FAMES (por *fatty acid methyl esters*) fueron preparados de acuerdo al método ISO-5509-2000 (26, 28). Los extractos lipídicos se saponificaron con 4 mL de una solución metanólica de NaOH al 0,5 M a 90°C por 10 min., y luego, se metilaron con 5 mL de una solución metanólica de BF₃ al 14% a 90°C por 3 min. Los FAMES fueron extraídos de la solución metanólica con adición de 3 mL de n-hexano y 20 mL de una solución saturada de NaCl. Las muestras se mezclaron manualmente por 30 s y el volumen se completó hasta 50 mL con una solución saturada de NaCl. Después de 2 h se realizó una separación en dos fases. La fase verde oscura superior fue recolectada y centrifugada por 20 min. a 2.500 r.p.m. (a 22°C), para separar la fracción de hexano de la emulsión (5, 60).

Análisis cromatográficos. Después de la recolección de la fracción de hexano, los FAMES (1 mL) se inyectaron directamente en un cromatógrafo de gases HP 6890, con un sistema de detección a la llama (FID, *flame ionisation detection*), y se usó una columna capilar FAMEWAX (RESTEK, Francia, Ref. 12497), de 30 m x 0,25 mm ID x 0,25 μ m df. Los análisis se desarrollaron con un programa de temperatura de 185°C a 225°C a 4°C/min. y una temperatura isotérmica por 10 min. a 225°C. El gas portador fue el Helio a 40 cm.s⁻¹ y se usó un split ratio de 1:100. Tanto el inyector como el detector estuvieron a 230°C.

Los FAMES se identificaron por comparación con estándares comerciales (Supelco) y se cuantificaron como porcentajes de los ácidos grasos totales (% w/w). Para cada genotipo, la composición en ácidos grasos se analizó por triplicado (a partir de tres diferentes extractos lipídicos). Los picos de los FAMES se integraron y analizaron usando el software ChemStation HP.

Estándares. Para la identificación de los FAMES se emplearon los siguientes estándares comerciales: Supelco™ 37 Component FAME Mix (Supelco, Ref. 47885-U), Grain Fatty Acid Methyl Ester Mix (Supelco, Ref. 47801), PUFA No. 3 from Menhaden Oil (Supelco, Ref. 47085-U), Linoleic Acid Methyl Ester Isomer Mix (Supelco, Ref. 47791) y Linolenic Acid Methyl Ester Isomer Mix (Supelco, Ref. 47792).

Variables lipídicas. Para todas las muestras se calculó el contenido de Lípidos totales, expresado como porcentaje en base seca (% bs) y el contenido en ácidos grasos, expresado como porcentaje relativo de ácidos grasos totales (%). Los ácidos grasos estudiados fueron: Palmítico (16:0, PAL), esteárico (18:0, EST), oleico (18:1, OLE), linoleico

(18:2, LINO), linolénico (18:3, LINOL), araquídico (20:0, ARA) y behénico (22:0, BEH). Adicionalmente, se calcularon las siguientes variables:

- TSFA: Suma de los valores de los porcentajes de los ácidos grasos saturados, por ejemplo, palmítico (16:0), esteárico (18:0), araquídico (20:0) y behénico (22:0).
- MUFA: Suma de los valores de los porcentajes del total de los ácidos grasos mono-insaturados por ejemplo, oleico (18:1), palmitoleico (16:1), cis-Vaccénico (18:1n-7) y gondoico (20:1n-9).
- PUFA: Suma de los valores de los porcentajes de los ácidos grasos poli-insaturados, por ejemplo, linoleico (18:2) y linolénico (18:3).
- ω -3/ ω -6 FA: Relación entre el ácido linolénico (18:3) y el ácido linoleico (18:2).

Para efectos del análisis, los ácidos grasos con contenidos superiores al 0,5% (>0,5%) fueron considerados como ácidos grasos mayoritarios y los ácidos grasos con contenidos inferiores fueron considerados como minoritarios. Los contenidos de estos últimos sólo fueron tenidos en cuenta para el cálculo del porcentaje relativo de ácidos grasos totales y para el cálculo de los MUFA.

Variables climáticas. Para cada localidad del estudio se determinaron las siguientes variables climáticas: Altitud (m), humedad relativa (%), precipitación (mm), brillo solar (h), temperatura máxima (°C), temperatura media (°C) y temperatura mínima (°C), las cuales se calcularon como valores promedio, en cuatro períodos diferentes, definidos de la siguiente forma:

El primer período correspondió al valor promedio del mes de recolección

específico en cada localidad, para cada una de las condiciones climáticas estudiadas. Posteriormente, a partir de la fecha de recolección, específica de cada localidad, se calculó del promedio de los 4, 8 y 12 meses antes de la cosecha para cada variable estudiada. El segundo período correspondió a los 4 últimos meses de desarrollo del endospermo, durante el cual se llevó a cabo la acumulación de los lípidos (15). El tercer período seleccionado correspondió a los 8 meses de desarrollo completo de los granos, y finalmente, el cuarto período seleccionado correspondió a los 12 últimos meses antes de la cosecha. Esto con el fin de estimar las condiciones climatológicas que podrían influenciar la fisiología entera de la planta de café y no sólo la fisiología de desarrollo del grano.

Diseño experimental y análisis estadísticos.

Las muestras se analizaron bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial de 5 x 12 (cinco localidades: Naranjal, Paraguaicito, El Rosario, El Tambo y Pueblo Bello, y 12 genotipos). Para los análisis

cromatográficos, se realizaron tres extracciones por muestra, para un total de 180 análisis, por dos inyecciones en el cromatógrafo de gases GC-FID.

Para los análisis estadísticos se utilizaron los paquetes estadísticos SAS/STAT® 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2000) y XLSTAT® versión 2009.3.02 (Addinsoft SARL, France, 1995-2009). El análisis de varianza (ANOVA) de 2-vías se utilizó para probar los efectos del genotipo, de la localidad y de su interacción, en cada variable estudiada. El test de Newman y Keuls se empleó para llevar a cabo la comparación múltiple de medias. Las correlaciones lineales, evaluadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson, permitieron estimar la relación entre los parámetros climatológicos y las variables lipídicas. Los análisis de componentes principales (ACP) y el análisis factorial discriminante (AFD) se utilizaron para estudiar la clasificación de los genotipos y de las localidades con base en la composición lipídica de los granos de café verde.

Tabla 2. Estadística descriptiva de las variables lipídicas en muestras de café verde de 12 genotipos, recolectadas en cinco localidades de Colombia (Cosecha principal del año 2006).

Parámetros	Lípidos totales (% bs)	Ácido palmítico 16:0 (%)	Ácido esteárico 18:0 (%)	Ácido oleico 18:1 (%)	Ácido linoleico 18:2 (%)	Ácido linolénico 18:3 (%)	Ácido araquídico 20:0 (%)	Ácido behénico 22:0 (%)
Valor mínimo	11,1	30,6	5,8	6,6	31,2	1,0	2,0	0,4
Valor máximo	16,9	43,1	12,1	11,2	46,4	1,8	4,3	1,5
Media	14,1	37,0	8,1	8,7	39,0	1,4	3,2	0,8
Desviación Estándar	1,2	2,6	1,4	0,9	3,4	0,2	0,5	0,2
Desviación Estándar Experimental	0,524	0,265	0,058	0,060	0,225	0,018	0,039	0,019
Total de valores	174	174	174	174	174	174	174	174

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición lipídica de los granos de café verde. En la Tabla 2, se presenta la estadística descriptiva para el contenido de Lípidos totales y de los siete ácidos grasos mayoritarios estudiados en muestras de café verde de 12 genotipos recolectados en cinco localidades (Naranjal, Paraguaicito, El Rosario, Pueblo Bello y El Tambo) durante la cosecha principal del año 2006.

Los contenidos en Lípidos totales, encontrados en el presente estudio, estuvieron de acuerdo con aquellos reportados en la literatura para la especie *C. arabica* (31, 32, 39, 48). Se cuantificaron 24 ácidos grasos en las muestras de café verde, los cuales pueden ser separados en cinco grupos, de acuerdo con su porcentaje relativo, así:

1. Ácidos grasos >30%: ácido palmítico (16:0) y ácido linoleico (18:2).
2. Ácidos grasos >5%: ácido esteárico (18:0) y ácido oleico (18:1).
3. Ácidos grasos >1%: ácido linolénico (18:3) y ácido araquídico (20:0).
4. Ácidos grasos >0,5%: ácido behénico (22:0).
5. Ácidos grasos >0,1%: ácido *cis*-vaccénico (18:1n-7), ácido gondoico (20:1) y ácido lignocérico (24:0).

También se encontraron y cuantificaron otros ácidos grasos con contenidos menores del 0,1%, en los granos de café verde de los genotipos evaluados (datos no presentados) (57, 58).

Los porcentajes relativos de los dos principales ácidos grasos, linoleico y palmítico, fueron similares a los reportados para café verde en la especie *C. arabica*, con valores de 44,1% y 33,3%, respectivamente (38).

La composición de ácidos grasos mayoritarios (>0,5%) estuvo de acuerdo

con la reportada en la literatura para la especie *Arábica*. Por ejemplo, para los ácidos palmítico (16:0), oleico (18:1), linoleico (18:2) y Linolénico (18:3), la composición reportada varía entre 30%-35%, 7%-10%, 43%-54% y 1,0%-2,6%, respectivamente, para la fracción presente en los triglicéridos (20, 29, 32, 33, 38, 41, 47, 49). Para la fracción presente en los ácidos grasos libres, estos valores corresponden al 30%, 14%, 45% y 2%, respectivamente (41).

En un estudio anterior, se analizó el contenido en ácidos grasos en cuatro de las 11 líneas avanzadas consideradas en este trabajo, las cuales estaban sembradas en tres de las cinco localidades analizadas (Naranjal, Paraguaicito y El Rosario). En dicho estudio, el contenido en ácido palmítico (16:0) varió entre el 31,85% para el genotipo BGB.1033 en Paraguaicito y el 34,94% para el genotipo BGB.1076 en Naranjal. El porcentaje relativo en ácido oleico (18:1) varió entre el 9,19% para el genotipo BGB.1033 en El Rosario y el 10,23% para el genotipo BGB.1076 en Paraguaicito. Así mismo, para el ácido linoleico (18:2), el contenido varió entre el 41,61% para el genotipo BGB.1076 en la localidad de Naranjal y el 45,50% para el genotipo BGB.1033 en la localidad de Paraguaicito. Por último, para el ácido linolénico (18:3), el contenido varió entre el 1,37% para el genotipo BGB.1076 en la localidad de Naranjal y el 1,63% para el genotipo BGB.1033 en la localidad de Paraguaicito (5). En todos los casos, los valores obtenidos para los diferentes compuestos fueron similares a los reportados en el presente estudio.

En otro trabajo similar, Villarreal *et al.* (60) analizaron la composición en ácidos grasos en tres (BGB.1033, BGB.1076 y BGB.1040) de las 11 líneas avanzadas, sembradas en las mismas localidades (Cosecha del año 2005). Los resultados mostraron que la composición

relativa en ácidos grasos mayoritarios durante 2 años consecutivos (2005 y 2006), fue muy similar a la reportada en este trabajo. Por ejemplo, para el ácido oleico (18:1) la composición varió entre 8,7% y 11,40% para el año 2005 y entre 7,68% y 11,18% para el año 2006. Para el ácido linoléico (18:2), la composición fue muy similar entre los dos años, entre 1,4% y 1,7% y entre 1,25% y 1,7%, para los años 2005 y 2006, respectivamente. Sin embargo, cuando se analizaron otros ácidos grasos mayoritarios, la variación de un año a otro fue mayor a la observada en este estudio. Estas diferencias podrían estar asociadas con las condiciones particulares de clima registradas de un año a otro, entre las localidades estudiadas.

En general, los ácidos grasos se encontraron en todos los genotipos, independientemente de las localidades de siembra (Tabla 3). Adicionalmente, no hubo diferencias en la clase de ácido graso presente en los diferentes genotipos para alguna de las localidades estudiadas. Lo anterior sugiere que *a priori*, ninguno de los ácidos grasos identificados es capaz de diferenciar por sí solo un genotipo o una localidad particular.

Efecto del genotipo y de la localidad sobre la composición lipídica. En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de varianza de 2-vías para la variable contenido en lípidos totales (% b.s.) y para el contenido de los ácidos grasos mayoritarios (composición >0,5%), considerando el genotipo, la localidad y su interacción. Dado que las muestras de la variedad Caturra no se encontraban disponibles para las localidades de Naranjal y El Tambo, se llevaron a cabo tres análisis de varianza independientes: El primer análisis se realizó para todas las localidades en las cuales estaba la variedad Caturra. El segundo análisis se realizó para las localidades donde no había plantas de la variedad Caturra,

mientras que el tercer análisis involucró sólo tres de las localidades (excepto El Tambo y Naranjal) en las cuales la variedad Caturra estuvo presente.

Los resultados para el contenido de los ácidos grasos mostraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los genotipos y entre las localidades, excepto para el ácido palmítico (16:0), el cual no mostró diferencias en las tres localidades donde la variedad Caturra estuvo presente.

La interacción genotipo x localidad fue significativa para todas las variables analizadas, sugiriendo una influencia clara del ambiente sobre estos compuestos químicos analizados. La variación total para el contenido en lípidos totales fue alta, ya que los valores oscilaron entre el 11,9% para el genotipo BGB.1033 en la localidad de El Tambo hasta el 16,7% para el genotipo BGB.1235 en la localidad de Paraguaicito. La variación entre las localidades para esta variable también fue alta, con valores promedio que oscilaron entre el 13,1% en la localidad de El Tambo hasta el 15% en la localidad de Paraguaicito. La comparación entre genotipos también mostró diferencias importantes en el contenido de lípidos totales cuyos valores variaron entre 13,1% para el genotipo BGB.1285 y 15,7% para la variedad Caturra.

A diferencia de los resultados reportados previamente por Bertrand *et al.* (5), en este estudio el ácido oleico (18:1) presentó diferencias significativas entre todas las localidades estudiadas (Tabla 4). El efecto localidad fue altamente significativo para todos los ácidos grasos excepto para el ácido palmítico (16:0).

La información sobre la existencia de interacción entre genotipo x localidad constituye un indicador muy útil del posible valor

Tabla 3. Contenido en Lípidos totales y en ácidos grasos totales (Porcentaje relativo promedio \pm Desviación estándar) en muestras de café verde de 12 genotipos, en cinco localidades de la región cafetera colombiana, durante la cosecha principal del año 2006.

Genotipo	Localidad	Lípidos totales (% bs)	Ácido palmítico 16:0 (%)	Ácido esteárico 18:0 (%)	Ácido oleico 18:1 (%)	Ácido linoleico 18:2 (%)	Ácido linolénico 18:3 (%)	Ácido araquídico 20:0 (%)	Ácido behénico 22:0 (%)
BGB.1033	Naranjal	13,51 \pm 0,41	36,44 \pm 0,22	8,26 \pm 0,01	8,68 \pm 0,03	38,97 \pm 0,17	1,35 \pm 0,01	3,18 \pm 0,001	0,82 \pm 0,0002
	Paraguaicito	14,38 \pm 0,49	37,20 \pm 0,30	9,39 \pm 0,03	9,44 \pm 0,11	37,30 \pm 0,23	1,30 \pm 0,01	3,26 \pm 0,01	0,85 \pm 0,004
	Pueblo Bello	12,21 \pm 0,42	33,30 \pm 0,02	6,66 \pm 0,03	8,68 \pm 0,01	44,77 \pm 0,01	1,66 \pm 0,01	2,54 \pm 0,01	0,58 \pm 0,02
	El Rosario	14,47 \pm 1,10	30,68 \pm 0,09	6,24 \pm 0,003	11,18 \pm 0,01	46,18 \pm 0,25	1,70 \pm 0,05	2,05 \pm 0,02	0,44 \pm 0,01
	El Tambo	11,87 \pm 0,80	35,18 \pm 0,08	6,32 \pm 0,01	8,00 \pm 0,060	43,36 \pm 0,09	1,55 \pm 0,01	2,89 \pm 0,01	0,67 \pm 0,02
BGB.1352	Naranjal	12,93 \pm 0,30	37,09 \pm 0,07	8,20 \pm 0,06	8,44 \pm 0,02	39,03 \pm 0,08	1,38 \pm 0,01	3,05 \pm 0,001	0,78 \pm 0,03
	Paraguaicito	13,69 \pm 0,41	34,70 \pm 0,36	12,07 \pm 0,07	9,10 \pm 0,07	35,42 \pm 0,25	1,27 \pm 0,04	4,34 \pm 0,001	1,30 \pm 0,02
	Pueblo Bello	14,05 \pm 0,46	39,54 \pm 0,03	7,80 \pm 0,03	8,62 \pm 0,01	36,76 \pm 0,04	1,38 \pm 0,01	3,51 \pm 0,01	0,71 \pm 0,01
	El Rosario	14,26 \pm 0,94	37,78 \pm 0,28	8,78 \pm 0,18	7,99 \pm 0,02	38,24 \pm 0,004	1,41 \pm 0,01	3,24 \pm 0,08	0,81 \pm 0,01
	El Tambo	12,67 \pm 0,31	37,40 \pm 0,04	6,64 \pm 0,01	7,26 \pm 0,01	42,05 \pm 0,05	1,51 \pm 0,02	2,72 \pm 0,02	0,61 \pm 0,005
BGB.1253	Naranjal	13,61 \pm 0,02	33,85 \pm 0,01	7,66 \pm 0,06	10,19 \pm 0,01	40,31 \pm 0,18	1,48 \pm 0,01	3,75 \pm 0,02	0,70 \pm 0,02
	Paraguaicito	15,54 \pm 0,41	35,68 \pm 0,07	9,69 \pm 0,09	10,3 \pm 0,02	35,95 \pm 0,05	1,23 \pm 0,002	3,60 \pm 0,05	1,54 \pm 0,01
	Pueblo Bello	12,41 \pm 0,20	36,25 \pm 0,06	6,43 \pm 0,02	8,07 \pm 0,01	42,49 \pm 0,003	1,52 \pm 0,01	2,86 \pm 0,02	0,62 \pm 0,01
	El Rosario	15,00 \pm 1,31	37,51 \pm 0,02	8,14 \pm 0,01	9,48 \pm 0,02	37,58 \pm 0,03	1,37 \pm 0,03	3,10 \pm 0,04	0,76 \pm 0,02
	El Tambo	13,58 \pm 0,85	33,61 \pm 0,004	6,02 \pm 0,05	9,08 \pm 0,01	44,79 \pm 0,03	1,57 \pm 0,01	2,38 \pm 0,02	0,56 \pm 0,02
BGB.1285	Naranjal	13,42 \pm 1,09	37,36 \pm 0,16	8,12 \pm 0,14	8,91 \pm 0,09	38,31 \pm 0,20	1,39 \pm 0,01	3,29 \pm 0,005	0,73 \pm 0,03
	Paraguaicito	14,11 \pm 0,29	41,50 \pm 0,04	10,44 \pm 0,02	8,39 \pm 0,02	31,28 \pm 0,04	1,14 \pm 0,03	4,22 \pm 0,03	1,16 \pm 0,01
	Pueblo Bello	12,33 \pm 0,53	35,57 \pm 0,27	6,40 \pm 0,06	10,00 \pm 0,12	40,42 \pm 0,04	1,70 \pm 0,02	2,88 \pm 0,02	0,64 \pm 0,001
	El Rosario	13,04 \pm 0,39	34,97 \pm 0,12	7,02 \pm 0,07	9,73 \pm 0,01	41,46 \pm 0,09	1,52 \pm 0,01	2,89 \pm 0,12	0,66 \pm 0,02
	El Tambo	12,51 \pm 0,57	33,67 \pm 0,07	5,96 \pm 0,04	9,06 \pm 0,19	44,33 \pm 0,14	1,74 \pm 0,03	2,32 \pm 0,02	0,72 \pm 0,03
BGB.1076	Naranjal	13,98 \pm 0,73	37,62 \pm 0,49	8,52 \pm 0,13	9,19 \pm 0,14	37,25 \pm 0,56	1,30 \pm 0,04	3,40 \pm 0,09	0,80 \pm 0,05
	Paraguaicito	14,98 \pm 0,27	35,44 \pm 0,44	9,41 \pm 0,06	10,35 \pm 0,12	36,59 \pm 0,42	1,25 \pm 0,02	3,42 \pm 0,01	0,93 \pm 0,02
	Pueblo Bello	14,13 \pm 0,76	37,73 \pm 0,06	7,73 \pm 0,01	8,72 \pm 0,02	37,85 \pm 0,04	1,36 \pm 0,01	3,43 \pm 0,05	1,06 \pm 0,003
	El Rosario	14,32 \pm 1,11	37,48 \pm 0,25	8,12 \pm 0,06	9,27 \pm 0,06	37,90 \pm 0,22	1,34 \pm 0,02	3,20 \pm 0,03	0,74 \pm 0,02
	El Tambo	13,49 \pm 0,93	33,81 \pm 0,06	6,12 \pm 0,01	8,76 \pm 0,01	44,42 \pm 0,02	1,60 \pm 0,03	2,43 \pm 0,01	0,62 \pm 0,01
BGB.1219	Naranjal	15,02 \pm 0,35	41,14 \pm 0,21	9,41 \pm 0,08	8,40 \pm 0,06	32,85 \pm 0,25	1,18 \pm 0,02	3,56 \pm 0,04	0,88 \pm 0,03
	Paraguaicito	15,40 \pm 0,23	39,64 \pm 0,09	10,36 \pm 0,06	9,30 \pm 0,02	33,01 \pm 0,07	1,24 \pm 0,01	3,78 \pm 0,01	0,94 \pm 0,004
	Pueblo Bello	14,28 \pm 0,14	36,46 \pm 0,12	6,67 \pm 0,03	9,37 \pm 0,03	40,87 \pm 0,10	1,56 \pm 0,02	2,67 \pm 0,01	0,54 \pm 0,02
	El Rosario	14,35 \pm 0,41	38,19 \pm 0,02	7,87 \pm 0,03	9,34 \pm 0,02	37,89 \pm 0,04	1,43 \pm 0,001	2,94 \pm 0,02	0,68 \pm 0,02
	El Tambo	13,52 \pm 0,33	43,11 \pm 0,01	7,38 \pm 0,03	7,37 \pm 0,003	35,33 \pm 0,001	1,26 \pm 0,02	3,08 \pm 0,01	0,71 \pm 0,02
BGB.1140	Naranjal	14,64 \pm 0,49	35,26 \pm 0,07	7,95 \pm 0,04	9,05 \pm 0,08	40,31 \pm 0,11	1,31 \pm 0,03	2,99 \pm 0,08	0,85 \pm 0,01
	Paraguaicito	16,00 \pm 0,17	36,44 \pm 0,04	9,77 \pm 0,001	9,12 \pm 0,06	37,61 \pm 0,05	1,23 \pm 0,02	3,27 \pm 0,02	0,84 \pm 0,01
	Pueblo Bello	14,82 \pm 0,36	37,47 \pm 0,07	7,68 \pm 0,01	8,85 \pm 0,03	38,97 \pm 0,01	1,27 \pm 0,02	3,21 \pm 0,01	0,71 \pm 0,04
	El Rosario	14,84 \pm 0,14	36,20 \pm 0,28	8,08 \pm 0,005	8,90 \pm 0,01	39,29 \pm 0,44	1,39 \pm 0,02	2,97 \pm 0,02	0,71 \pm 0,03
	El Tambo	13,84 \pm 0,18	41,28 \pm 0,17	7,96 \pm 0,01	6,62 \pm 0,02	37,05 \pm 0,28	1,20 \pm 0,01	3,41 \pm 0,01	0,80 \pm 0,03
BGB.1235	Naranjal	16,45 \pm 0,54	35,40 \pm 0,29	8,38 \pm 0,12	9,45 \pm 0,07	38,97 \pm 0,31	1,32 \pm 0,01	3,23 \pm 0,07	0,83 \pm 0,02
	Paraguaicito	16,68 \pm 0,23	36,24 \pm 0,59	9,69 \pm 0,22	9,53 \pm 0,16	38,98 \pm 0,83	1,24 \pm 0,03	3,07 \pm 0,10	0,82 \pm 0,02
	Pueblo Bello	13,74 \pm 0,99	38,50 \pm 0,04	7,35 \pm 0,01	8,84 \pm 0,03	38,47 \pm 0,06	1,29 \pm 0,004	3,16 \pm 0,05	0,69 \pm 0,04
	El Rosario	15,70 \pm 0,72	40,43 \pm 0,42	9,81 \pm 0,07	8,20 \pm 0,01	34,03 \pm 0,04	1,07 \pm 0,03	4,03 \pm 0,04	0,91 \pm 0,02
	El Tambo	14,21 \pm 0,45	37,83 \pm 1,20	8,62 \pm 0,09	7,49 \pm 0,19	40,08 \pm 0,54	1,32 \pm 0,01	2,80 \pm 0,12	0,65 \pm 0,03

Continúa...

Continuación...

Genotipo	Localidad	Lípidos totales (% bs)	Ácido palmítico 16:0 (%)	Ácido esteárico 18:0 (%)	Ácido oleico 18:1 (%)	Ácido linoleico 18:2 (%)	Ácido linolénico 18:3 (%)	Ácido araquídico 20:0 (%)	Ácido behénico 22:0 (%)
BGB.1049	Naranjal	13,68±0,88	36,02±0,88	8,15±0,16	8,04±0,17	40,50±0,94	1,49±0,05	3,10±0,09	0,79±0,02
	Paraguaicito	14,71±1,06	36,23±0,40	8,91±0,07	9,33±0,09	38,19±0,36	1,45±0,03	3,25±0,02	0,81±0,02
	Pueblo Bello	13,11±0,25	33,90±0,49	8,05±0,03	8,51±0,03	41,40±0,19	1,67±0,02	3,46±0,02	0,52±0,03
	El Rosario	13,32±0,23	35,96±0,45	7,31±0,04	8,95±0,12	40,55±0,24	1,61±0,02	2,90±0,06	0,70±0,04
	El Tambo	12,63±0,42	33,87±0,04	5,86±0,02	8,28±0,02	45,76±0,04	1,74±0,01	2,24±0,001	0,49±0,01
BGB.1044	Naranjal	13,96±1,05	33,10±0,81	8,15±0,11	8,73±0,13	42,13±0,15	1,47±0,05	3,18±0,06	0,72±0,03
	Paraguaicito	14,75±0,26	39,79±0,19	10,19±0,04	8,66±0,03	33,91±0,15	1,25±0,01	3,80±0,03	0,93±0,004
	Pueblo Bello	12,58±0,37	42,08±0,46	8,62±0,10	7,52±0,06	34,34±0,50	1,26±0,02	3,67±0,05	0,77±0,01
	El Rosario	13,74±0,85	38,10±0,08	7,79±0,02	8,45±0,02	38,84±0,09	1,38±0,01	3,00±0,03	0,72±0,01
	El Tambo	12,45±1,18	39,70±0,15	7,17±0,05	7,38±0,04	38,87±0,15	1,43±0,00	2,92±0,01	0,66±0,01
BGB.1040	Naranjal	13,68±0,76	40,17±0,29	9,84±0,08	7,92±0,09	33,60±0,04	1,19±0,01	4,16±0,06	0,87±0,04
	Paraguaicito	14,37±0,40	33,43±0,30	8,55±0,03	10,25±0,08	40,64±0,21	1,49±0,01	3,08±0,03	0,74±0,02
	Pueblo Bello	13,75±0,37	37,44±0,14	7,55±0,04	8,52±0,05	39,87±0,07	1,44±0,01	3,10±0,003	0,61±0,01
	El Rosario	14,07±0,78	40,79±0,21	8,50±0,02	7,97±0,01	35,75±0,21	1,31±0,02	3,25±0,03	0,72±0,03
	El Tambo	13,16±1,02	35,98±0,20	6,15±0,04	8,26±0,04	43,78±0,38	1,60±0,01	2,54±0,03	0,55±0,02
Catura	Naranjal	-	-	-	-	-	-	-	-
	Paraguaicito	15,71±0,24	39,42±0,26	11,62±0,05	7,57±0,07	34,31±0,35	1,18±0,03	4,10±0,10	1,14±0,03
	Pueblo Bello	15,30±0,45	37,92±0,19	7,77±0,04	7,33±0,05	39,87±0,19	1,51±0,01	3,13±0,05	0,68±0,02
	El Rosario	15,96±0,85	36,52±0,41	8,21±0,13	8,06±0,08	40,26±0,51	1,46±0,02	2,94±0,08	0,71±0,04
	El Tambo	-	-	-	-	-	-	-	-

discriminante de un compuesto lipídico particular. En este caso, sin embargo, los resultados muestran que al menos para la cosecha del año 2006, todos los ácidos grasos presentaron interacciones muy significativas entre genotipo x localidad.

Estudios recientes muestran que la proporción de ácidos poliinsaturados (PUFA), monoinsaturados (MUFA) y saturados (TSFA), analizados mediante resonancia magnética nuclear y mediante la técnica NIRS, pueden ser usados para la caracterización del origen geográfico de algunos productos alimenticios (14, 44). En la naturaleza, existen varios ácidos grasos poliinsaturados que el organismo humano no puede sintetizar, entre ellos están los ácidos linoleico (18:2) y alfa-linolénico (18:3), debido a que los mamíferos carecen de las enzimas necesarias

para insertar dobles enlaces en los átomos de carbono más allá del carbono 9 a partir del carboxilo terminal. Por lo tanto, éstos deben obtenerse en la dieta y se les conoce como ácidos grasos esenciales. Estos ácidos grasos, son conocidos también como Omega-6 (ω -6) y Omega-3 (ω -3), respectivamente; además, estos ácidos grasos son precursores de los PUFAs de cadena más larga y con mayor número de insaturaciones como son los ácidos araquidónico, eicosapentaenoico (EPA) y el docosahexaenoico (DHA), los cuales desempeñan un papel esencial en la producción de eicosanoides importantes en los procesos fisiológicos y en la salud humana (51). Las enzimas elongasas y desaturasas que participan en la síntesis de los ácidos grasos son afectadas por múltiples factores ambientales como la temperatura, por lo que la composición en ácidos grasos

Tabla 4. Resultados del análisis de varianza de 2-vías, para ocho variables lipídicas estudiadas en cinco localidades diferentes, considerando las 11 líneas (excepto la variedad Caturra) o tres localidades (excepto El Tambo y Naranjal) y los doce genotipos (incluida la variedad Caturra), en muestras de café verde recolectadas durante la cosecha principal del año 2006.

Variable		Genotipo		Localidad		Genotipo* Localidad	
		MS	p	MS	p	MS	p
Lípidos totales (% bs)	Con Caturra	8,29	0,0001	17,87	0,0001	0,87	0,0010
	Sin Caturra	7,40	0,0001	18,22	0,0001	0,86	0,0017
	Con Caturra sin T y N*	5,36	0,0001	19,61	0,0001	1,15	0,0001
Ácido palmitico (%)	Con Caturra	31,97	0,0001	1,00	0,0001	18,15	0,0001
	Sin Caturra	34,49	0,0001	1,08	0,0001	18,73	0,0001
	Con Caturra sin T y N*	21,98	0,0001	0,16	0,112 n.s	16,59	0,0001
Ácido oleico (%)	Con Caturra	3,53	0,0001	51,98	0,0001	1,81	0,0001
	Sin Caturra	3,35	0,0001	46,26	0,0001	1,81	0,0001
	Con Caturra sin T y N*	3,14	0,0001	67,68	0,0001	1,95	0,0001
Ácido linoleico (%)	Con Caturra	3,92	0,0001	9,62	0,0001	1,36	0,0001
	Sin Caturra	2,70	0,0001	9,68	0,0001	1,40	0,0001
	Con Caturra sin T y N*	3,05	0,0001	4,34	0,0001	1,58	0,0001
Ácido linolénico (%)	Con Caturra	39,47	0,0001	146,00	0,0001	22,78	0,0001
	Sin Caturra	43,41	0,0001	133,31	0,0001	23,53	0,0001
	Con Caturra sin T y N*	29,29	0,0001	129,77	0,0001	21,04	0,0001
Ácido linolénico (%)	Con Caturra	0,14	0,0001	0,29	0,0001	0,04	0,0001
	Sin Caturra	0,16	0,0001	0,26	0,0001	0,04	0,0001
	Con Caturra sin T y N*	0,10	0,0001	0,36	0,0001	0,04	0,0001
Ácido araquídico (%)	Con Caturra	0,36	0,0001	3,84	0,0001	0,49	0,0001
	Sin Caturra	0,38	0,0001	3,43	0,0001	0,50	0,0001
	Con Caturra sin T y N*	0,62	0,0001	3,23	0,0001	0,46	0,0001
Ácido behénico (%)	Con Caturra	0,06	0,0001	0,72	0,0001	0,06	0,0001
	Sin Caturra	0,06	0,0001	0,63	0,0001	0,06	0,0001
	Con Caturra sin T y N*	0,11	0,0001	1,13	0,0001	0,08	0,0001

*Con el genotipo Caturra, pero sin las localidades de El Tambo (T) y Naranjal (N).

MS: Cuadrado medio, p: nivel de confianza al 99,9 % y ns: no significativo.

de muchas especies vegetales puede variar grandemente (6).

En muchas semillas de especies oleaginosas la temperatura ambiente es un factor que juega un papel importante en la determinación de la composición final en ácidos grasos. En café parece suceder lo mismo, dado que las enzimas que participan en la síntesis de ácidos grasos, se comportan de manera similar a como lo hacen en otras especies

vegetales (60). Así, cuando disminuye la temperatura se observa un incremento en el contenido de los ácidos grasos poliinsaturados linoleico (18:2) y linolénico (18:3) y una disminución en el contenido del ácido monoinsaturado oleico (18:1) en granos de café verde. Por lo tanto, para el caso del café, la variación en la composición en ácidos grasos parece obedecer a diferencias en las temperaturas que prevalecen en cada medio ambiente estudiado.

En este estudio, se analizó por primera vez el efecto del genotipo, de la localidad y de su interacción, en la composición total de los ácidos grasos saturados (TSFA), mono (MUFA) y poliinsaturados (PUFA) presentes en granos verdes de café. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los genotipos y entre las localidades, así como en la interacción genotipo x localidad (Tabla 5).

En la Tabla 6, se presenta el análisis de comparación del promedio del contenido de lípidos totales y otros compuestos relacionados (TSFA, MUFA, PUFA y ω -3/ ω -6 FA), para las cinco localidades estudiadas durante la cosecha principal del año 2006. El contenido en lípidos totales osciló entre 13,08% para la localidad de El Tambo y 15,03% para la localidad de Paraguaicito. Para el contenido promedio de los ácidos grasos saturados totales (TSFA), también se encontraron diferencias significativas entre las diferentes localidades. Los contenidos para esta variable estuvieron entre 46,95% y 51,75%. Así mismo, el contenido en ácidos grasos mono-insaturados totales (MUFA) varió entre el 8,94% y el 10,08%. A diferencia de las variables anteriores, el contenido en ácidos grasos poli-insaturados totales (PUFA) presentó una mayor variación (entre 37,37% y 43,30%). Por último, para

la relación entre el ácido linolénico y el linoleico (ω -3/ ω -6 FA), el valor encontrado varió entre 0,035 y 0,037 (Tabla 6).

Para el contenido en Lípidos totales se encontraron diferencias significativas entre los genotipos estudiados, su contenido varió entre el 13,08% para el genotipo BGB.1285 y el 15,66% para el genotipo Caturra. Para los TSFAs, el contenido varió entre el 45,39% para el genotipo BGB.1033 y el 52% para el genotipo BGB.1219 (Tabla 7). Para los MUFAs, el contenido varió entre el 8,48% para Caturra y el 10,39% para el genotipo BGB.1253. Para los PUFAs, el contenido varió entre el 37,32% para el genotipo BGB.1219 y el 43,63% para el genotipo BGB.1033. En la relación entre el ácido Linolénico y el Linoleico (ω -3/ ω -6 FA), los valores oscilaron entre 0,0327 para el genotipo BGB.1235 y 0,0385 para el genotipo BGB.1049 (Tabla 7).

El conjunto de resultados presentados sugiere que las diferencias observadas entre genotipos y entre localidades para las variables TSFA, MUFA y PUFA, así como para los ácidos grasos individuales, podrían tener una aplicación directa en la construcción de curvas de calibración y de predicción de compuestos lipídicos mediante la técnica NIRS. De ser así, sería posible evaluar rápida y precisamente un elevado número

Tabla 5. Resultados del análisis de varianza de 2-vías para las variables contenido en ácidos grasos saturados totales (TSFA), mono-insaturados totales (MUFA), poli-insaturados totales (PUFA) y en la relación entre el ácido linolénico y el linoleico (ω -3/ ω -6 FA) en muestras de café verde recolectadas durante la cosecha principal del año 2006.

Variable	Genotipo		Localidad		Genotipo* Localidad	
	MS	<i>p</i>	MS	<i>p</i>	MS	<i>p</i>
TSFA (%)	60,00	0,0001	101,73	0,0001	35,01	0,0001
MUFA (%)	4,48	0,0001	7,71	0,0001	1,60	0,0001
PUFA (%)	43,14	0,0001	158,88	0,0001	24,64	0,0001
ω -3/ ω -6 FA	0,00004	0,0001	0,000001	0,0001	0,000003	0,0001

MS: Cuadrado medio; y *p*: nivel de confianza al 99,9 %.

Tabla 6. Análisis de comparación del contenido promedio en lípidos totales (LIP) y en ácidos grasos saturados totales (TSFA), mono-insaturados totales (MUFA), poli-insaturados totales (PUFA) y en la relación entre el ácido linoléico y el linoleico (ω -3/ ω -6 FA), entre las cinco localidades estudiadas durante la cosecha principal del año 2006.

Localidad	LIP (% bs)	TSFA (%)	MUFA (%)	PUFA (%)	ω -3/ ω -6 FA
Naranjal	14,08c	49,25b	9,71c	39,74d	0,0352d
Paraguaicito	15,03a	51,75a	10,08a	37,37e	0,0353d
El Rosario	14,42b	48,80c	9,86b	40,41c	0,0362b
El Tambo	13,08e	46,95e	8,94e	43,30a	0,0359c
Pueblo Bello	13,56d	48,38d	9,51d	41,14b	0,0370a

* Los promedios seguidos por letras diferentes difieren al $p < 0,01$, de acuerdo a la prueba de Newman y Keuls.

Tabla 7. Análisis de comparación del contenido promedio en lípidos totales y en ácidos grasos saturados totales (TSFA), mono-insaturados totales (MUFA), poli-insaturados totales (PUFA) y en la relación entre el ácido linoléico y el linoleico (ω -3/ ω -6 FA), entre los 12 genotipos recolectados durante la cosecha principal del año 2006.

Genotipo	LIP (% bs)	TSFA (%)	MUFA (%)	PUFA (%)	ω -3/ ω -6 FA
Caturra	15,66a	51,39b	8,48h	39,53f	0,0362c
BGB.1040	13,81e	49,60e	9,44e	40,13e	0,0363c
BGB.1044	13,50f	51,01c	8,99g	38,98h	0,0362c
BGB.1049	13,49f	46,50i	9,55d	42,87b	0,0385a
BGB.1235	15,36a	50,49d	9,58d	39,35g	0,0327f
BGB.1140	14,83b	49,57e	9,40e	39,92e	0,0330f
BGB.1219	14,51b	52,00a	9,65c	37,32i	0,0370b
BGB.1076	14,18c	48,40f	10,20b	40,17e	0,0353e
BGB.1285	13,08f	48,10g	10,15b	40,66d	0,0382a
BGB.1253	14,03c	46,94h	10,39a	41,66c	0,0356d
BGB.1352	13,52f	50,22d	9,15f	39,69f	0,0363c
BGB.1033	13,29f	45,39j	10,13b	43,63a	0,0359d

*Los promedios seguidos por letras diferentes difieren al $p < 0,01$, de acuerdo a la prueba de Newman y Keuls.

de muestras de café verde con el fin de predecir su origen geográfico, acelerando los procesos de diferenciación que actualmente se realizan en las diferentes regiones productoras del grano en el país. Una estrategia similar ha venido siendo usada desde hace varios años en algunos productos alimenticios de importancia comercial (14, 44).

Efecto de las variables climáticas sobre la composición lipídica. Los resultados de este estudio permitieron poner en evidencia el

efecto de algunos de los factores climatológicos estudiados sobre el contenido en lípidos totales. Dado que el efecto de las diferentes variables climáticas fue similar para todos los genotipos, se realizó un análisis de correlación tomando en cuenta el conjunto de genotipos (Tabla 8).

Para el contenido en lípidos totales, las correlaciones más significativas se presentaron con las temperaturas máxima, media y mínima ($^{\circ}\text{C}$) en los cuatro períodos evaluados, al

igual que con la variable precipitación (mm) al momento de la cosecha. Sin embargo, los valores de correlación fueron menores respecto a los reportados previamente por Villarreal *et al.* (60), lo cual se debió probablemente a las diferencias de clima en cada localidad entre un experimento y otro.

La correlación entre el contenido en lípidos totales y la temperatura fue positiva, mientras que entre éste y la humedad relativa se presentó un efecto negativo cuando se consideraron tanto los cuatro períodos como el período de los últimos 5 meses, evaluados en la cosecha del año 2005 (56). En otros términos, el contenido en lípidos totales se incrementó durante el período caliente y seco que caracterizó la época de recolección. Dichos resultados son similares a los obtenidos durante la cosecha del año 2006 en todos los períodos, al igual que en los últimos 5 meses que precedieron a la cosecha (56, 59, 60). Es de anotar que durante la cosecha principal del año 2006, el ácido palmítico no presentó correlación significativa con alguna de las variables de clima analizadas, en los cuatros períodos seleccionados (Tabla 8).

Respecto a la variable precipitación, la correlación entre ésta y el contenido en lípidos totales fue negativa en tres de los cuatro períodos analizados (4, 8 y 12 meses) en las cosechas de los años 2005 y 2006 (56, 60). Joët *et al.* (29), observaron una tendencia igual al estudiar los contenidos de lípidos totales en *C. arabica* var. Laurina. A diferencia de la cosecha del año 2005 (56, 60), en el año 2006 esta misma correlación fue significativa no sólo para el período de los 8 meses sino también para el período de 4 meses y al momento de la cosecha. Sin embargo, en la cosecha del año 2006 esta última correlación fue positiva (Tabla 8).

Para la totalidad de los ácidos grasos, las correlaciones con todas las variables de temperatura (máxima, media y mínima) en los cuatro períodos evaluados fueron significativas, excepto para el ácido palmítico (Tabla 8), el cual durante la cosecha del año 2005, presentó una correlación negativa y significativa (56, 60). La temperatura máxima presentó una correlación significativa y positiva para los ácidos grasos saturados (esteárico, araquídico y behénico); la temperatura media presentó una correlación positiva sobre estos mismos ácidos grasos y sobre el ácido graso mono-insaturado (oleico), con un valor de R menor para este último; mientras que todas las variables de temperatura mostraron una correlación significativa y negativa sobre los ácidos grasos poli-insaturados (linoleico y linolénico), en los cuatro períodos evaluados. Estas mismas correlaciones también fueron encontradas por Villarreal *et al.* (56, 60).

A diferencia de este estudio, en las correlaciones encontradas por Joët *et al.* (2010) en café *C. arabica* var. Laurina cultivado en la Isla de la Reunión, en el período de los últimos 5 meses antes de la cosecha, el ácido linolénico no presentó alguna correlación significativa con las variables de clima, mientras que el ácido palmítico presentó una correlación significativa y negativa con la variable temperatura (29). Esta última correlación también fue reportada por Villarreal *et al.* (60).

Para los ácidos grasos saturados (esteárico y araquídico), el período de los últimos 4 meses proporcionó los niveles de significancia más altos de correlación con la temperatura máxima, mientras que para los poli-insaturados el período que tuvo el mayor efecto fue el período correspondiente a los 12 últimos meses antes de la cosecha en la variable temperatura mínima (Tabla 8).

Tabla 8. Coeficiente de correlación de Pearson (R) y significación entre siete factores ambientales en cuatro períodos diferentes (al momento de la cosecha, 4, 8 y 12 meses antes de la cosecha) y las ocho variables lipídicas (contenido en lípidos totales y composición en siete ácidos grasos totales), para 12 genotipos recolectados en cinco localidades diferentes (Cosecha principal del año 2006).

Factores medio ambientales	Período (meses)	Lípidos totales (% ms)	Ácido palmítico 16:0 (%)	Ácido esteárico 18:0 (%)	Ácido oleico 18:1 (%)	Ácido linoleico 18:2 (%)	Ácido linolénico 18:3 (%)	Ácido araquídico 20:0 (%)	Ácido behénico 22:0 (%)
Humedad relativa (%)	0	-0,04 n.s.	0,05 n.s.	-0,09 n.s.	-0,07 n.s.	-0,03 n.s.	0,10 n.s.	0,09 n.s.	-0,12 n.s.
	4	-0,28***	0,04 n.s.	-0,31***	-0,19*	0,17*	0,25**	-0,12 n.s.	-0,22**
	8	-0,29***	0,04 n.s.	-0,31***	-0,21**	0,19*	0,25**	-0,14*	-0,21**
	12	-0,24**	0,04 n.s.	-0,24**	-0,18*	0,15*	0,21**	-0,10 n.s.	-0,15*
Precipitación (mm)	0	0,43***	0,04 n.s.	0,64***	0,43***	-0,47***	-0,43***	0,56***	0,50***
	4	-0,19*	-0,02 n.s.	-0,26***	-0,05 n.s.	0,09 n.s.	0,13***	0,01 n.s.	-0,26***
	8	-0,15*	-0,04 n.s.	-0,24**	-0,04 n.s.	0,09 n.s.	0,09 n.s.	-0,01 n.s.	-0,26***
	12	-0,005 n.s.	-0,06 n.s.	-0,06 n.s.	0,001 n.s.	0,04 n.s.	-0,05 n.s.	-0,03 n.s.	-0,09 n.s.
Brillo solar (h)	0	-0,40***	0,03 n.s.	-0,61***	-0,31***	0,37***	0,43***	-0,39***	-0,52***
	4	-0,09 n.s.	0,04 n.s.	-0,07 n.s.	0,16*	-0,04 n.s.	0,08 n.s.	0,01 n.s.	-0,17*
	8	-0,02 n.s.	0,05 n.s.	-0,20**	0,06 n.s.	0,05 n.s.	0,18*	-0,07 n.s.	-0,25***
	12	-0,12 n.s.	0,05 n.s.	-0,28***	-0,01 n.s.	0,10 n.s.	0,22**	-0,09 n.s.	-0,30***
Temperatura máxima (°C)	0	0,36***	0,01 n.s.	0,70***	0,31***	-0,45***	-0,44***	0,56***	0,63***
	4	0,45***	0,02 n.s.	0,72***	0,43***	-0,52***	-0,46***	0,62***	0,60***
	8	0,41***	0,02 n.s.	0,67***	0,42***	-0,49***	-0,42***	0,61***	0,54***
	12	0,36***	0,02 n.s.	0,62***	0,38***	-0,46***	-0,39***	0,59***	0,51***
Temperatura media (°C)	0	0,40***	0,01 n.s.	0,71***	0,38***	-0,49***	-0,45***	0,61***	0,61***
	4	0,46***	0,02 n.s.	0,71***	0,46***	-0,52***	-0,44***	0,61***	0,56***
	8	0,43***	0,02 n.s.	0,67***	0,44***	-0,50***	-0,41***	0,60***	0,53***
	12	0,43***	0,02 n.s.	0,68***	0,44***	-0,50***	-0,42***	0,60***	0,54***
Temperatura mínima (°C)	0	0,45***	0,01 n.s.	0,63***	0,46***	-0,48***	-0,40***	0,55***	0,46***
	4	0,43***	0,02 n.s.	0,56***	0,45***	-0,45***	-0,36***	0,52***	0,40***
	8	0,43***	0,01 n.s.	0,60***	0,45***	-0,46***	-0,39***	0,54***	0,44***
	12	0,49***	0,00 n.s.	0,67***	0,46***	-0,49***	-0,44***	0,54***	0,51***
Altitud	-	-0,20**	-0,03 n.s.	-0,41***	-0,25**	0,33***	0,23**	-0,46***	-0,35***

Nota: En negrilla los valores significativos a un nivel de confianza del 99,9% (***) del 99% (**) y del 95% (*).
n.s.: No significativo.

Para los ácidos grasos de cadena larga (araquídico y behénico) se presentó una correlación positiva significativa para los tres valores de temperatura en todos los períodos evaluados, mientras que para los ácidos grasos poli-insaturados (linoleico y linolénico) la correlación fue significativamente negativa. Estos resultados confirman aquellos encontrados previamente en muestras de café verde analizadas en la cosecha principal del año 2005, en todos los períodos estudiados, así como en el período de los 5 meses antes de la cosecha (56, 60).

A diferencia de otros trabajos precedentes (4, 16), en este estudio se encontró una correlación negativa entre el contenido de lípidos totales y la altitud; sin embargo, dicha correlación sólo fue significativa para tres de los 12 genotipos estudiados (BGB.1219, BGB.1140 y BGB.1049). Estos resultados parecen estar en concordancia con estudios previos, en los cuales no existe un consenso sobre la verdadera relación entre la altitud y el contenido de lípidos totales. Así, mientras algunos afirman que estos compuestos parecen aumentar con la altitud

(23) otros lo atribuyen a la variedad (29) o simplemente estiman que no existe alguna relación particular (2).

En este estudio, la correlación entre la altitud y el contenido de los ácidos grasos fue negativa, excepto para los ácidos grasos poli-insaturados (linoleico y linolénico), para los cuales esta correlación fue positiva. En otras palabras, a mayor altitud mayor contenido de estos ácidos grasos, lo cual podría ser explicado porque los niveles de insaturación de los lípidos están determinados por la activación de las enzimas desaturasas a baja temperatura y su inactivación a altas temperaturas (61). Por lo tanto, la actividad de la desaturasa estaría inversamente relacionada con la temperatura y directamente relacionada con la altitud. Resultados similares fueron encontrados por Joët *et al.* (29), quien atribuye la variación de los ácidos grasos poli-insaturados, a las diferencias de temperatura en cada sitio de estudio durante el desarrollo de la semilla.

Análisis de la capacidad discriminante de los ácidos grasos mayoritarios y del contenido de lípidos totales. Con el fin de establecer la capacidad discriminante de las variables mencionadas, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) así como un Análisis Factorial Discriminante (AFD), tomando como base la información del contenido de ácidos grasos mayoritarios y de lípidos totales para los 12 genotipos estudiados en las cinco localidades.

El ACP para todas las variables lipídicas (contenido en lípidos totales y el contenido en siete ácidos grasos mayoritarios), reveló que los Factores 1 y 2 estaban explicando el 60,42% y el 19,96% de la varianza total, respectivamente. Sin embargo, cuando el mismo análisis se hizo incluyendo sólo los ácidos grasos mayoritarios, los Factores 1 y

2 explicaron el 65,83% y el 20,57% de la varianza total, respectivamente. En este último caso, los dos factores explicaron más del 86,40% de la varianza total. Adicionalmente, cuando fueron incluidos los ácidos grasos mayoritarios y las variables calculadas (TSFA, MUFA y PUFA), los Factores 1 y 2 explicaron el 66,20% y el 22,61% de la varianza total, respectivamente. En este último caso, los dos factores explicaron más del 88,81% de la varianza total. En la Figura 1 se presentan las coordenadas factoriales de las variables lipídicas en los dos primeros componentes principales (F1 y F2).

Teniendo en cuenta las variables que más contribuyeron a los factores (cuyos valores propios fueron mayores de 1) se encontró que aquellas que más contribuyeron al Factor 1 fueron en su orden: Los ácidos grasos saturados, tales como el ácido palmítico (eigenvector = 0,313), el ácido esteárico (eigenvector = 0,328), y el ácido araquídico (eigenvector = 0,346); igualmente la variable TSFA (eigenvector = 0,382) y los ácidos grasos poli-insaturados: Ácido linoleico (eigenvector = -0,377) y el ácido linolénico (eigenvector = -0,354) y la variable PUFA (eigenvector = -0,378).

Por su parte, las variables que más contribuyeron a explicar la varianza total en el Factor 2 fueron el ácido oleico (eigenvector = 0,611) y la variable MUFA (eigenvector = 0,591). Debido a que la variable contenido en lípidos totales nunca contribuyó de manera significativa a la varianza total en alguno de los análisis realizados, esta variable fue removida de los análisis subsiguientes.

Martín *et al.* (2001), llevaron a cabo la discriminación de muestras de café verde y tostado de las especies *C. arabica* y *C. canephora* var. Robusta, utilizando para ello la composición en ácidos grasos. En

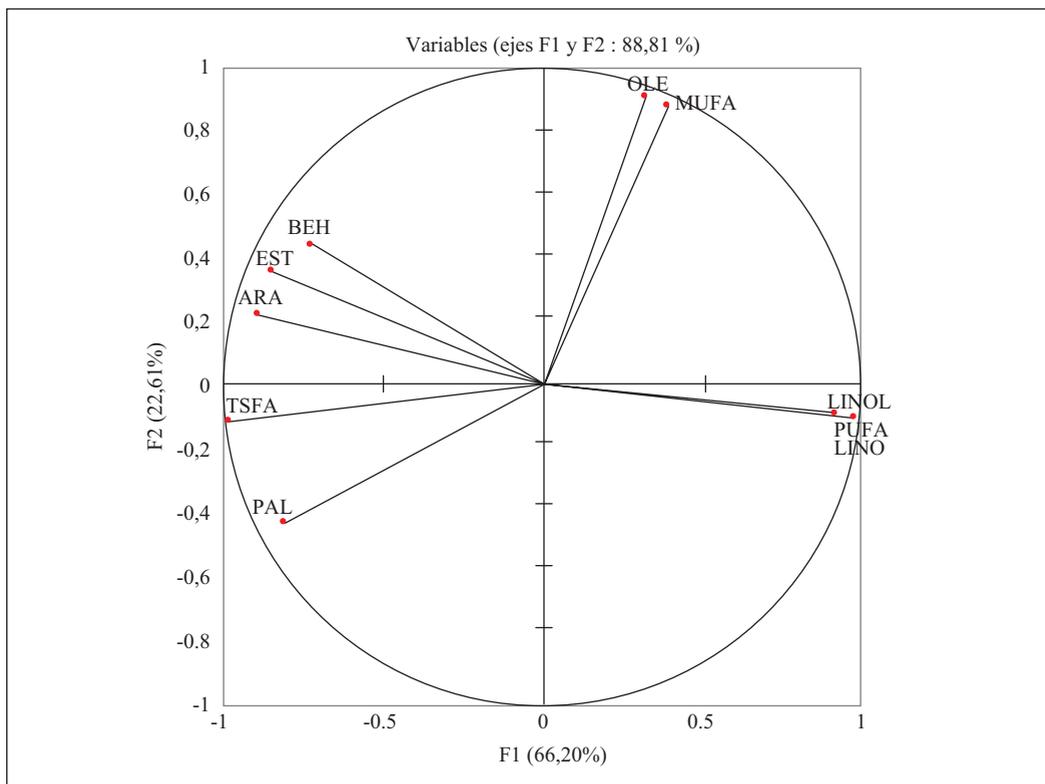


Figura 1. Análisis de Componentes Principales (ACP) de las muestras de granos de café verde de 12 genotipos diferentes, recolectados en cinco localidades (cosecha del año 2006) basado en su composición lipídica. Coordenadas factoriales de los ácidos grasos mayoritarios (PAL, ácido palmítico; EST, ácido esteárico; OLE, ácido oleico; LINO, ácido linoleico; LINOL, ácido linolénico; ARA, ácido araquídico y BEH, ácido behénico) junto con las variables calculadas (TSFA, MUFA y PUFA), en los dos primeros componentes principales (F1 y F2).

dicho estudio, los dos primeros componentes principales explicaron el 62,1% de la varianza total. Los ácidos grasos oleico, linolénico, linoleico y mirístico, fueron los que más contribuyeron al Factor 1. Estos ácidos grasos fueron considerados como descriptores químicos y fueron propuestos para diferenciar las dos especies de café, ya que permitieron su completa separación (38). En el presente estudio, la contribución de las variables estudiadas en los dos primeros factores fue mayor, ya que explicaron más del 85% de la varianza total y permitieron la separación de las muestras de

C. arabica de acuerdo a su localidad u origen geográfico. Lo que ha permitido el desarrollo de curvas de calibración y de predicción de los compuestos lipídicos (lípidos totales y siete ácidos grasos) mediante NIRS, para la diferenciación y la discriminación del café y para el Proyecto de “Denominación de Origen del Café de Colombia”.

El Análisis Factorial Discriminante (AFD) permitió una discriminación completa entre genotipos respecto a las cinco localidades estudiadas, usando como base la composición

en ácidos grasos mayoritarios en combinación con las variables calculadas (Figura 2). El primer eje factorial permitió una excelente separación de las localidades de Paraguaicito, Pueblo Bello y El Tambo del grupo de las localidades de Naranjal y El Rosario, el segundo eje no permitió la separación de estas dos últimas localidades, las cuales aparecen muy próximas entre ellas. A diferencia de los resultados encontrados en las muestras de la cosecha del año 2005 (56, 60), para las muestras de la cosecha del año 2006 se observó que los ácidos grasos mayoritarios tuvieron un menor efecto discriminante entre localidades (97,29% vs. 99,00%).

En general, los ácidos grasos mayoritarios junto con las variables calculadas, en muestras de café verde de la cosecha del año 2006,

fueron más eficaces en discriminar por localidades (97,29%) que en discriminar entre genotipos (75,44%).

Los resultados presentados en este estudio aportan nueva evidencia del efecto significativo del genotipo y de la localidad sobre el contenido de los lípidos totales y de los ácidos grasos totales en muestras de café verde de genotipos de la especie *C. arabica*. Aunque la interacción genotipo x localidad fue significativa, su efecto sobre las variables lipídicas fue menos evidente. Con relación a las variables ambientales, sólo la temperatura mostró tener un efecto sobre el contenido de compuestos lipídicos en las muestras analizadas. Se encontró una correlación significativa positiva entre ésta y el contenido de lípidos totales, así como con

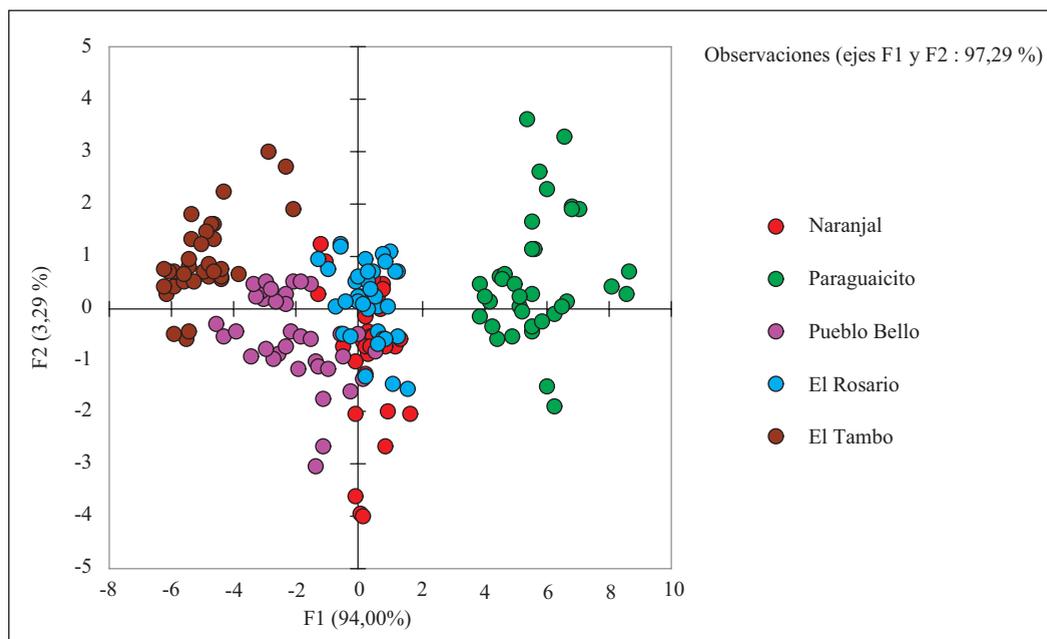


Figura 2. Análisis Factorial Discriminante (AFD) de las cinco localidades estudiadas, basada en la composición en ácidos grasos mayoritarios y en las variables calculadas, a partir de muestras de granos de café verde de 12 genotipos diferentes, recolectadas durante la cosecha principal del año 2006. Resultados en los dos primeros ejes factoriales.

los ácidos grasos esteárico, oleico, araquídico y behénico, mientras que una correlación inversa y significativa se dio para los ácidos linoleico y linolénico.

Es de resaltar que los genotipos estudiados corresponden a líneas avanzadas del programa de mejoramiento genético de Cenicafé que se caracterizan por su alta productividad, excelente calidad de grano y elevada resistencia a la roya del cafeto. Desde el punto de vista genético son genotipos muy homogéneos, ya que se derivan de cruzamientos con el híbrido de Timor (HdT), una planta genéticamente compatible con las variedades tradicionales como Caturra. Dado que no se observaron diferencias entre Caturra y las 11 líneas estudiadas con respecto a las variables analizadas, es de suponer que la carga genética derivada del HdT y presente en las líneas mejoradas no tuvo un efecto sobre los contenidos lipídicos analizados. Estas observaciones confirman la bondad de realizar una selección genética muy rigurosa, como la que ha sido aplicada para el desarrollo de las variedades producidas por Colombia (por ejemplo, Colombia, Variedad Castillo® y Tabi). Adicionalmente, confirman la posibilidad real de obtener genotipos de calidad excelente a partir de cruzamientos con el HdT (55).

Desde el punto de vista aplicado, el conjunto de resultados confirman el potencial de los ácidos grasos como herramienta de discriminación quimiométrica en muestras de café verde. Los análisis discriminantes mostraron que es posible separar muestras de café de diferentes localidades, con base en la información aportada por los ácidos grasos mayoritarios (ácidos palmítico, esteárico, oleico, linoleico, linolénico, araquídico y behénico), y las variables lipídicas calculadas: TSFA, MUFA y PUFA. El uso de esta información en proyectos de caracterización de *terroirs*

sobre la región cafetera, representa una nueva aproximación al estudio de la calidad diferencial del café de Colombia.

Los datos generados por este estudio ya fueron integrados a la base de datos del NIRS desarrollada por Cenicafé, donde están siendo usados para la construcción de curvas de calibración y de predicción de diferentes compuestos lipídicos (lípidos totales y siete ácidos grasos). Gracias a esta metodología hoy es posible evaluar de manera más rápida y eficiente un mayor número de muestras de café, contribuyendo al desarrollo de estrategias de diferenciación tanto por el origen genético como por el origen geográfico del café cultivado en las distintas regiones del país. Un ejemplo de ello es el Proyecto: “Denominación de Origen del Café de Colombia”, que actualmente lidera Cenicafé.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, a Cenicafé y al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, por su apoyo financiero a través del proyecto Genoma. Igualmente agradecen al personal de las Estaciones Experimentales de Cenicafé por su colaboración en la recolección de las muestras de café, así como a los auxiliares que colaboraron en la preparación de las muestras para los análisis.

LITERATURA CITADA

1. ANDERSON, K.A.; SMITH, B.W. Chemical profiling to differentiate geographic growing origins of coffee. *Journal of agricultural and food chemistry* 50:2068-2075. 2002.
2. AVELINO, J.; BARBOZA, B.; ARAYA, J.C.; FONSECA, C.; DAVRIEUX, F.; GUYOT, B.; CILAS, C. Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terroirs of

- Costa Rica, Orosi and Santa María de Dota. Journal of the science of food and agriculture 85(11):1869-1876. 2005.
3. BERTRAND, B.; ETIENNE, H.; LASHERMES, P.; GUYOT, B.; DAVRIEUX, F. Can near infrared reflectance of green coffee be used to detect introgression in *Coffea arabica* cultivars?. Journal of the science of food and agriculture 85:955-962. 2005.
 4. BERTRAND, B.; VAAST, P.; ALPIZAR, E.; ETIENNE, H.; DAVRIEUX, F.; CHARMENTANT, P. Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America. Tree physiology 26(9):1239-1248. 2006.
 5. BERTRAND, B.; VILLARREAL, D.; LAFFARGUE, A.; POSADA, H.; LASHERMES, P.; DUSSERT, S. Comparison of the effectiveness of fatty Acids, chlorogenic Acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) varieties and growing origins. Journal of agricultural and food chemistry 56(6):2273-2280. 2008.
 6. CAMAS, N.; CIRAK, C.; ESENDAL, E. Seed yield, oil content and fatty acids composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown in northern turkey conditions. Journal of the faculty of agriculture OMU 22(1):98-104. 2007.
 7. CANO M., A.; TARÍN, J.J.; CANO, A. The impact of coffee on health. Maturitas 75(1):7-21. 2013.
 8. CARRERA, F.; LEÓN C., M.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A.G. Authentication of green coffee varieties according to their sterolic profile. Analytica chimica acta 370:31-139. 1998.
 9. CASAL, S.; OLIVEIRA, M.B.P.P.; ALVES, M.R.; FERREIRA, M.A. Discriminate analysis of roasted coffee varieties for trigonelline, nicotinic acid and caffeine content. Journal of agricultural and food chemistry 48:3420-3424. 2000.
 10. CASAL, S.; RUI A., M.; MENDES, E.; OLIVEIRA, M.B.P.P.; FERREIRA, M.A. Discrimination between Arabica and Robusta coffee species on the basis of their amino acid enantiomers. Journal of agricultural and food chemistry 51:6495-6501. 2003.
 11. CAVIN, C.; HOLZHAUSER, D.; SCHARF, G.; CONSTABLE, A.; HUBER, W.W.; SCHILTER, B. Cafestol and Kahweol, two coffee specific diterpenes with anticarcinogenic activity. Food and chemical toxicology 40(8):1155-1163. 2002.
 12. CHU, Y.F.; CHEN Y.; BLACK, R.M.; BROWN, P.H.; LYLE, B.J.; LIU, R.H.; OU, B. Type 2 diabetes-related bioactivities of coffee: Assessment of antioxidant activity, NF- κ B inhibition, and stimulation of glucose uptake. Food chemistry 124(3):914-920. 2011.
 13. CLIFFORD, M.N. Chemical and physical aspects of green coffee and coffee products. En: CLIFFORD, M.N.; WILLSON, K.C. Coffee botany, biochemistry and production of beans and beverage. Beckenham : Provident house, 1985.
 14. COPPA, M.; FERLAY, A.; LEROUX, C.; JESTIN, M.; CHILLIARD, Y.; MARTIN, B.; ANDUEZA, D. Prediction of milk fatty acid composition by near infrared reflectance spectroscopy. International dairy journal 20:182-189. 2010.
 15. DE CASTRO, R.D.; MARRACINI, P. Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. Brazilian journal of plant physiology 18(1):175-199. 2006.
 16. DECAZY, F.; AVELINO, J.; GUYOT, B.; PERRIOT, J.; PINEDA, C.; CILAS, C. Quality of different Honduran coffees in relation to several environments. Journal of food science 68(7):2356-2361. 2003.
 17. DIRICK, M.I.; VAN L., I.; DIRICK, J.P. Analytical flavour characterisation and classification of Arabica and Robusta coffees from different origins. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (19 : Mayo 14-18 2001 : Trieste). Italia : ASIC, 2001.
 18. FLAMENT, I. Coffee flavor chemistry. Chichester : John Wiley and Sons, 2002. 532 p.
 19. FOLCH, J.; LEES, M.; SLOANE S., G.H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. The journal of biological chemistry 226:497-509. 1957.
 20. FOLSTAR, P. Lipids. p. 203-222. En : CLARKE, R.J.; MACRAE, R. Coffee: Chemistry. London : Elsevier, 1985.
 21. GONZÁLEZ, A.G.; PABLOS, F.; MARTIN, M.J.; LEO C., M.; VALDENEBRO, M.S. HPLC analysis of tocopheroles and triglycerides in coffee and their use as authentication parameters. Food chemistry 73:93-101. 2001.
 22. GUERRERO, G.; SUÁREZ, M.; MORENO, G. Hydroxycinnamic acids as genotype discrimination criteria for green coffee beans. En: COLLOQUE

- Scientifique international sur le café. (19 : Mayo 14-18 2001 : Trieste). Italia : ASIC, 2001.
23. GUYOT, B.; GUEULE, D.; MANEZ, J.C.; PERRIOT, J.J.; GIRON, J.; VILLAIN, L. Influence de l'altitude et de l'ombrage sur la qualité des cafés Arabica. *Plantations, recherche, développement* 3(4):272-280. 1996.
 24. GUZMÁN M., O.; JARAMILLO R., A.; BALDIÓN R., J.V. Anuario meteorológico cafetero 2006. Chinchiná : FNC, 2008. 564 p.
 25. HAIDUC, A.; GANCEL, C.; LELOUP, V. NIR-based determination of differences in green coffee chemical composition due to geographical origin. p. 143-149. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (21 : Septembre 11-15 2006 : Montpellier). Paris : ASIC, 2006.
 26. ISO. Animal and vegetable fats and oils: Preparation of methyl esters of fatty acids. Ginebra : ISO, 2000. 24 p. (International standard ISO 5509).
 27. ISO. Green coffee: Determination of loss mass at 105°C. Ginebra : ISO, 2003. 4 p. (International standard ISO 6673).
 28. ISO. Préparation des esters méthyliques d'acides gras. Paris:AFNOR, 2000. 25p. (Norme NF EN ISO.5509).
 29. JOËT, T.; LAFFARGUE, A.; DESCROIX, F.; DOULBEAU, S.; BERTRAND, B.; DE KOCHKO, A.; DUSSERT, S. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food chemistry* 118:693-701. 2010.
 30. KURZROCK, T.; SPEER, K. Diterpenes and diterpene esters in coffee. *Food reviews international* 17(4):433-450. 2001.
 31. KY, C.L.; LOUARN, J.; DUSSERT, S.; GUYOT, B.; HAMON, S.; NOIROT, M. Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. canephora* P. accessions. *Food chemistry* 75(2):223-230. 2001.
 32. LAGO, R.C.A. Lipídios em grãos de café. B. CEPPA. Curitiba 19(2):319-340. 2001.
 33. LERCKER, G.; CABONI, M.F.; BERTACCO, G.; TURCHETTO, E.; LUCCI, A.; BORTOLOMEAZZI, R.; FREGA, N.; BOCCI, F. La frazione lipidica del café: Influenze della torrefazione e della decaffeinizzazione. *Industrie alimentari* 35:1057-1062. 1996.
 34. LEROY, T.; RIBEYRE, F.; BERTRAND, B.; CHARMETANT, P.; DUFOUR, M.; MONTAGNON, C.; MARRACCINI, P.; POT, D. Genetics of coffee quality. *Brazilian journal of plant physiology* 18(1):229-242. 2006.
 35. MARTÍN, M.J.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A.G. Characterization of green coffee varieties according to their metal content. *Analytica chimica acta* 358(2):177-183(7). 1998.
 36. MARTÍN, M.J.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A.G. Discrimination between Arabica and Robusta coffee varieties according to their chemical composition. *Talanta* 46(6):1259-1264. 1998.
 37. MARTÍN, M.J.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A.G. Characterization of arabica and robusta roasted coffee varieties and mixture resolution according to their metal content. *Food chemistry* 66:365-370. 1999.
 38. MARTÍN, M.J.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A.G.; VALDENEBRO, M.S.; LEÓN C., M. Fatty acid profiles as discriminant parameters for coffee varieties differentiation. *Talanta* 54:291-297. 2001.
 39. MAZZAFERA, P.; SOAVE, D.; TEIXEIRA, M.A.; GUERREIRO, O. Oil content of green beans from some coffee species. *Bragantia* 57(1):45-48. 1998.
 40. MURIEL, P.; ARAUZ, J. Coffee and liver diseases. *Fitoterapia* 81(5):297-305. 2010.
 41. NIKOLOVAD., B.; VELIKOVA, R.; JHAM, G.N. Lipid classes, fatty acid composition and triacylglycerol molecular species in crude coffee beans harvested in Brazil. *Food reviews international* 31:479-486. 1998.
 42. PACETTI, D.; BOSELLI, E.; BALZANO, M.; FREGA, N.G. Authentication of italian espresso coffee blends through the GC peak ratio between Kahweol and 16-O-Methylcafestol. *Food chemistry* 135(3):1569-1574. 2012.
 43. PIMENTA, C.J. Qualidade de café. Lavras : UFPA, 2003. 297 p.
 44. RENO, J.P.; DEPONGE, C.; GACHON, P.; BONNEFOY, J.C.; COULON, J.B.; GAREL, J.P.; VERITE, R.; RITZ, P. Characterization of animal products according to geographic origin and feeding diet using nuclear magnetic resonance and isotope ratio mass spectrometry: cow milk. *Food chemistry* 85(1):63-66. 2004.

45. RUI A., M.; CASAL, S.; OLIVEIRA, M.B.P.P.; FERREIRA, M.A. Contribution of FA profile obtained by high-resolution GC/chemometric techniques to the authenticity of green and roasted coffee varieties. *Journal of the American Oil Chemists Society* 80:511-517. 2003.
46. SILVA, E.A.; MAZZAFERA, P.; BRUNINI, O.; SAKAI, E.; ARRUDA, F.B.; MATTOSO, L.H.C.; CARVALHO, C.R.L.; PIRES, R.C.M. The influence of water management and environmental conditions on the chemical composition and beverage quality of coffee beans. *Brazilian journal of plant physiology* 17(1):229-238. 2005.
47. SPEER, K.; SEHAT, N.; MONTAG, A. Fatty acids in coffee. p. 583-592. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (15 : Juin 6-11 1993 : Montpellier). Paris : ASIC, 1993.
48. SPEER, K.; KÖLLING S., I. Lipids. p. 33-49. En: CLARKE, R.J.; VITZTHUM, O.G. *Coffee recent developments*. Oxford : Blackwell science, 2001.
49. SPEER, K.; KÖLLING S., I. The lipid fraction of the coffee bean. *Brazilian journal of plant physiology* 18(1):201-216. 2006.
50. SPEER, K.; TEWIS, R.; MONTAG, A. 16-O-Methylcafestol: A quality indicator for coffee. p.237-244. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (14 : Juillet 14-19 1991 : San Francisco). Paris : ASIC, 1991.
51. SWANSON, D.; BLOCK, R.; MOUSA, S.A. Omega-3 fatty acids EPA and DHA: Health benefits throughout life. *Advances in nutrition* 3:1-7. 2012.
52. TERPSTRA, A.H.M.; KATAN, M.B.; WEUSTEN VAN D.W., M.P.M.E.; DE ROOS, B.; BEYNEN, A.C. The hypercholesterolemic effect of cafestol in coffee oil in gerbils and rats. *The journal of nutritional biochemistry* 11(6):311-317. 2000.
53. VAAST, P.; BERTRAND, B.; PERRIOT, J.J.; GUYOT, B.; GENARD, M. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the science of food and agriculture* 86(2):197-204. 2006.
54. VALDENOBRO, M.S.; LEÓN C., M.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A.G.; MARTÍN, M.J. Determination of the arabica/robusta composition of roasted coffee according to their sterolic content. *Analyst* 124:999-1002. 1999.
55. VAN D.V., H.A.M. Disease resistance and cup quality in Arabica coffee: The persistent myths in the coffee trade versus scientific evidence. p. 1351-1360. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (22 : Septembre 14-19 2008 : Campinas). Paris : ASIC, 2008.
56. VILLARREAL, D. Análisis de lípidos en granos de café de diferentes genotipos y localidades y su relación con la calidad, el aroma y el sabor del café: Informe final "Proyecto colaborativo entre Cenicafé y el IRD. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 63 p.
57. VILLARREAL, D. Informe de actividades proyecto genoma experimento GEN0211: "Establecimiento de una plataforma para la determinación del contenido total de lípidos y de la composición en ácidos grasos totales a partir de granos de café verde". Chinchiná : CENICAFÉ, 2007. 18 p.
58. VILLARREAL, D. Informe de actividades proyecto genoma experimento GEN1120: "Estudio de los lípidos del café y su relación con la calidad". Chinchiná : CENICAFÉ, 2008. 53 p.
59. VILLARREAL, D.; BERTRAND, B.; LAFFARGUE, A.; POSADA, H.; LASHERMES, P.; DUSSERT, S. Chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes and growing origins. p.1497-1506. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (22 : Septembre 14-19 2008 : Campinas). Paris : ASIC, 2008.
60. VILLARREAL, D.; LAFFARGUE, A.; POSADA, H.; BERTRAND, B.; LASHERMES, P.; DUSSERT, S. Genotypic and environmental effects on coffee (*Coffea arabica* L.) bean fatty acid profile: Impact on variety and origin chemometric determination. *Journal of agricultural and food chemistry* 57(23):11321-11327. 2009.
61. WILLIAMS, J.P.; KHAN, M.U.; WONG, D. Low temperature-induced fatty acid desaturation in *Brassica napus*: Terminal desaturation and reactivation of the process. *Biochimica et Biophysica Acta* 1128:275-279. 1992.
62. WILSON, A.J.; PETRACCO, M.; ILLY, E. Some preliminary investigations of oil biosynthesis in the coffee fruit and its subsequent re-distribution within green and roasted beans. p.92-99. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (17 : Juillet 20-25 1997 : Nairobi). Paris : ASIC, 1997.

AVIFAUNA DE LA RESERVA DE PLANALTO

Jorge Eduardo Botero-Echeverri*; Néstor Gustavo Franco-Rojas**; Rocío Espinosa-Aldana*;
Andrés Mauricio López-López***

RESUMEN

BOTERO E., J.E.; FRANCO R., N.G.; ESPINOSA A., R.; LÓPEZ L., A.M. Avifauna de la reserva de Planalto. Revista Cenicafé 63 (1): 41-56. 2012

La caracterización de la biodiversidad en la Reserva de Planalto es importante para la elaboración del plan de manejo y la selección y diseño de herramientas apropiadas para promover la conservación en dicha área. La lista de las especies de aves que aquí se presenta es el resultado de la recopilación de los estudios ornitológicos realizados en Planalto desde 1998, por investigadores de Cenicafé y por miembros de la Sociedad Caldense de Ornitología. A partir de un total de 9.576 registros ornitológicos, que corresponden a 15.794 individuos, se reportan 183 especies de aves, así: 26 especies migratorias boreales y 157 especies residentes, de las cuales tres son endémicas y tres casi endémicas. Dos especies han sido clasificadas como amenazadas por la UICN y 23 están en la lista de CITES. Es notoria la ausencia de especies y grupos de especies sensibles a la alteración de los bosques originales de la región. La diversidad aviar en Planalto ratifica la importancia de la Reserva tanto en el contexto municipal como en el regional, pero también confirma el efecto negativo del grado de alteración de los hábitats naturales en la Reserva y en la región y su aislamiento de otras áreas boscosas. Esta lista de aves sirve como línea base para el monitoreo de los efectos de las acciones de conservación realizadas en Planalto.

Palabras clave: Especies de aves, biodiversidad, zona cafetera, Manizales, Planalto.

ABSTRACT

Biodiversity studies in the Planalto Reserve are necessary inputs for the development of the reserve's management plan and the design of appropriate conservation tools. The bird list presented here is the result of all ornithological studies conducted since 1998 at Planalto by investigators of the former Conservation Biology Program and by members of the Caldas Ornithological Society. 183 bird species have been recorded at Planalto based on a total of 9576 ornithological observations, corresponding to 15794 individuals. The list includes 26 boreal migrants and 157 resident species, of which three are endemic and three near-endemic species. Two species are classified as endangered by IUCN, and 23 are included in the CITES list. There is a noticeable absence of species and species groups that are sensitive to transformation of original forest. The avian diversity at Planalto demonstrates the importance of the reserve in both municipal and regional contexts. But it also highlights the negative effect of the alteration of natural habitats both within the reserve and in the surrounding region, as well as its isolation from other forest fragments. There is, therefore, an urgent need at Planalto for action regarding the definition and implementation of a management plan, and the construction of tools to promote biodiversity conservation. This list also serves as a base line to monitor the effects of conservation actions applied at Planalto.

Keywords: Bird species, biodiversity studies, coffee-growing region, Manizales, Planalto.

* Investigador Científico III e Investigador Asociado, respectivamente. Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación, Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé. Manizales Caldas Colombia. Miembros de la Sociedad Colombiana de Ornitología - SCO.

** Técnico en Gestión de Recursos Naturales.

*** Investigador Asociado. Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación, Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé. Manizales Caldas Colombia.

En el proceso de planeación de la conservación de la biodiversidad en los paisajes rurales, Lozano (22) proponen una metodología que incluye cinco fases; en éstas se realiza el reconocimiento del territorio, la identificación y priorización de las oportunidades de conservación, el diseño y aplicación de las herramientas de manejo del paisaje y el seguimiento y evaluación del efecto del programa en la biodiversidad. Como parte de la segunda fase, la identificación de las oportunidades, la caracterización de la biodiversidad, tanto a nivel regional como en cada uno de los elementos del paisaje o localidades, adquiere especial importancia. Es a partir de los resultados del estudio de la biodiversidad que es posible identificar y priorizar los sitios en el paisaje con valor para la conservación y diseñar las herramientas apropiadas para promover la conservación. En esa etapa de caracterización es posible utilizar diferentes grupos taxonómicos como indicadores ambientales. Uno de esos grupos, reconocido por su utilidad, son las aves (6).

Planalto es una reserva forestal protectora situada en la ecorregión “bosque húmedo montano del Valle del Cauca”, la cual ha sido clasificada de importancia global y con alta prioridad a nivel regional (1, 10). Pero ésta también es una región constituida por un paisaje rural altamente transformado, en donde quedan pocos fragmentos de bosque y la gran mayoría de éstos son de tamaños pequeños, han sufrido un proceso avanzado de deterioro y carecen de conexiones entre sí. Debido al grado de alteración de las condiciones naturales, esta región a sido clasificada en estado “crítico”, en el que se considera que son bajas las probabilidades de que los ecosistemas naturales persistan hacia el futuro (10). En este contexto, la Reserva de Planalto adquiere especial importancia no solo a nivel local, sino también a nivel regional y global.

Caracterizar la biodiversidad en Planalto es una tarea necesaria para la elaboración de un adecuado plan de manejo de la reserva, pero también es útil para valorar y reconocer su papel dentro de los sistemas municipal y regional de áreas protegidas (SIMAP y SIRAP). En este artículo se presenta la lista de las especies de aves en Planalto, como una contribución al conocimiento de la biodiversidad en la reserva. Esta lista consolida los resultados de diferentes estudios ornitológicos realizados en Planalto desde 1999, tanto por investigadores de Cenicafé como por miembros de la Sociedad Caldense de Ornitología (SCO).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La Reserva Forestal Protectora de Planalto, con coordenadas geográficas 4°59'30''N y 75°35'30''W, está localizada en la vereda Las Pavas, en el extremo Suroccidental del municipio de Manizales, en el departamento de Caldas. Su topografía es extremadamente montañosa, con una elevación que varía entre 1.250 y 1.610 m de altitud, situada en la zona de vida (*sensu* Holdridge) del “bosque muy húmedo premontano” (bhm - PM) (30).

Planalto es actualmente una reserva privada, perteneciente a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Desde la compra de los terrenos en 1938 para albergar las instalaciones del Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, algunos sectores fueron reforestados parcialmente y en otros se inició un proceso de regeneración natural, que aunque no fue asistida, sí fue permitida. En el año 1991 se inició la construcción de la nueva sede de Cenicafé en los terrenos conocidos como Planalto, debido a los daños ocasionados por la avalancha causada por la erupción

del volcán Arenas del Nevado del Ruiz, ocurrida en 1985. El Centro empezó a desarrollar sus actividades en la sede de Planalto a partir de 1993, pero fue hasta el año 2002, que se adoptó el nombre de Reserva de Planalto, cuando se adelantó una campaña a favor de su conservación. En ese entonces, la Federación Nacional de Cafeteros y la comunidad de Cenicafé asumieron la defensa de los recursos naturales existentes en el predio que cubre una extensión de 101 hectáreas, ante la amenaza que se presentó por los planes para la explotación de una cantera de roca anfibolita en sus terrenos. Esa campaña fue exitosa y fue negada la licencia ambiental para realizar dicha explotación. Finalmente, en 2004, Planalto recibió un estatus formal de conservación y fue declarada como Reserva Forestal Protectora, según el acuerdo 024 de ese año, de la Corporación Autónoma Regional de Caldas, Corpocaldas. Desde ese entonces se ha adelantado en forma no continua un proceso de formulación y ejecución de un plan de manejo que incluye aspectos en los campos de la investigación, educación, recreación y conservación (32).

Con aproximadamente 101 hectáreas, Planalto comprende un mosaico de comunidades vegetales nativas y exóticas, en diferentes estados de desarrollo y composición: Incluye sectores con rastrojos, guaduales, cafetales de experimentación, jardines y las edificaciones de la sede principal del Centro Nacional de Investigaciones de Café “Pedro Uribe Mejía”, Cenicafé.

En la región donde se encuentra ubicada la Reserva Planalto, existe un mosaico heterogéneo de elementos del paisaje donde predominan cultivos de café a libre exposición, cultivos de frutales como naranjas y guayabas, pastizales, parches

de guadua y algunos pequeños fragmentos de bosque secundario en diferentes etapas de sucesión.

Diferentes estudios sobre la biodiversidad en Planalto han sido realizados por investigadores de Cenicafé, de los cuales existen resultados publicados sobre las especies de plantas vasculares (24, 31), briófitos (23), mariposas (12, 20, 21), otros insectos (13) y mamíferos (8), incluyendo los murciélagos (7). También existen publicaciones sobre los resultados de estudios ornitológicos (2, 3, 4, 38, 39). Sin embargo, no se cuenta con una lista consolidada de las especies de aves en Planalto y todavía no se han publicado los registros realizados desde la última publicación.

Muestreo de las aves. La lista de aves aquí presentada es el resultado de investigaciones ornitológicas realizadas en los últimos 13 años en Planalto, de 1998 a 2012, por parte de investigadores de Cenicafé y por miembros de la Sociedad Caldense de Ornitología, SCO. Se han realizado diferentes estudios, los cuales han utilizado diferentes metodologías de muestreo, de acuerdo a los objetivos buscados. El 81,6% de los registros se lograron entre 1998 y 2001, y el 18,4% entre 2002 y 2012.

Entre los estudios ornitológicos realizados en Planalto se destaca una serie de inventarios mensuales en el sector más bajo de la Reserva, denominado La Granja, los cuales fueron realizados por Verhelst, Fajardo y Orrego, entre septiembre de 1998 y noviembre de 2001 (3, 4), en los que se utilizó el método de censos desde puntos de conteo de radio fijo. En los años siguientes, se realizaron dos estudios sobre la avifauna regional, en los que fue incluida Planalto como una de las localidades de estudio; el primero fue una caracterización de la avifauna como parte del inventario y diagnóstico de la

biodiversidad en el municipio de Manizales, realizados por Verhelst y Rodríguez (5) y el inventario adelantado por López y Franco, como parte de las caracterizaciones de la biodiversidad en fragmentos de bosque en el proyecto “Efecto de la fragmentación de los bosques en la zona cafetera sobre la diversidad genética de poblaciones de flora y fauna silvestre” (25). En estos estudios se utilizaron los censos a lo largo de transectos de ancho fijo y capturas con redes de niebla.

Los diferentes sectores y hábitats presentes en la Reserva no han recibido la misma intensidad de muestreo. El sector de La Granja, en la parte baja, y aquellos cercanos a las edificaciones y campos de investigación han recibido mayor atención, debido principalmente a que son más accesibles a los investigadores. Los sectores de las partes más altas y más pendientes, que en la mayoría de los casos se encuentran bajo coberturas naturales, en estados más avanzados de sucesión, han recibido menor atención. Se estima que el 85% de los registros ornitológicos se han realizado en las zonas bajas y más accesibles, y el 15% en los sectores restantes. Además, la intensidad de muestreo no ha sido la misma en todos los meses del año.

Además, anualmente en el mes de diciembre desde el 2002, los investigadores de de Cenicafé en asocio con la SCO, han incluido a Planalto como una de las localidades de los censos navideños de aves. En estos estudios, los muestreos se realizaron en diferentes tipos de hábitats: bosque, rastrojo, café con sombra, café a libre exposición, jardín, cañada y guadual. La lista que aquí se presenta, también incluye los resultados de observaciones ocasionales o *ad libitum*, realizadas por investigadores de Cenicafé.

Recopilación. La información ornitológica de los diferentes estudios realizados en Planalto por investigadores de Cenicafé y la información de los censos navideños de aves, realizados por la SCO, fue reunida en una sola base de datos, la cual se utilizó para la conformación de la lista, la cual se presenta siguiendo la nomenclatura definida por el Comité Suramericano de Clasificación de la *American Ornithologists' Union* (35) el 31 de enero de 2014.

Análisis. Para determinar la representatividad de los muestreos de las aves en Planalto y estimar el número de especies esperadas o potencialmente presentes en la reserva, se elaboró una curva de acumulación con el programa StimateS (Version 8.2.0; Copyright R. K. Colwell: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates>), el cual se utiliza para estimar el número de especies probables a partir de las especies observadas. Debido al diverso origen de los datos, en cuanto a las metodologías utilizadas y años de los registros, se aleatorizaron los datos y se dividieron en muestras de 40 registros. La cifra de 40 fue seleccionada teniendo en cuenta la sugerencia de 20 hecha por Villarreal *et al.* (40) en el "Manual de Métodos Para el Desarrollo de Inventarios de Biodiversidad" y aumentada para que el número de muestras se ajustara al número máximo de columnas de excel. Se elaboró una matriz binaria para señalar presencia/ausencia de las especies en cada muestra. Se seleccionaron los estimadores CHAO2, Jack 1, Jack 2, y Bootstrap, que son los indicados cuando se cuenta con datos de presencia ausencia (40).

Las especies encontradas se clasificaron por familias siguiendo la secuencia taxonómica AOU (35), luego se identificaron las especies migratorias, las endémicas, las casi endémicas y las que tenían algún grado de amenaza (28, 33).

RESULTADOS

Riqueza y representatividad. Como resultado de las investigaciones ornitológicas en Planalto, se han recopilado 9.576 registros que corresponden a 15.794 individuos pertenecientes a 183 especies de aves confirmadas (Tabla 1). Esta cifra corresponde a cerca del 20% del total de especies registradas para el departamento de Caldas (9). Se excluyeron especies de la lista cuya presencia en Planalto parece improbable, y que además cuentan con muy pocos registros, por lo general con menos de cinco, y sin evidencia fotográfica o auditiva de su presencia. Pero sí se incluye una especie cuya presencia debe ser confirmada (cf *Myiarchus crinitus*), la cual fue observada por Juan C. Verhelst y David Fajardo en una finca cafetera cercana a Planalto (Juan C. Verhelst comunicación personal). Debido a que las especies de atrapamoscas migratorios tanto de los géneros *Contopus*

como *Empidonax* que han sido registradas en la región son tan parecidas y difíciles de identificar adecuadamente, especialmente en la época de invernación en el trópico, se decidió agruparlas y dejar su identificación a nivel de género.

Los estimadores utilizados para medir la efectividad de los muestreos se comportaron de manera similar, con valores cercanos a los observados y las líneas se acercaron a la asíntota (Figura 1). El porcentaje general de las especies esperadas fue del 90,4% manifestándose así: para Jack 1 (89,5%), Jack 2 (85,6%), Chao 2 (91,7%) y Bootstrap (94,7%). Al superar el 85%, el muestreo puede considerarse como representativo (40). En este estudio, el indicador más bajo (Jack2) señaló un 86% de las especies encontradas y el más alto (Boopstrap) el 95%. Según estos estimadores, en la Reserva Forestal de Planalto se podrían encontrar entre 193 y 214 especies.

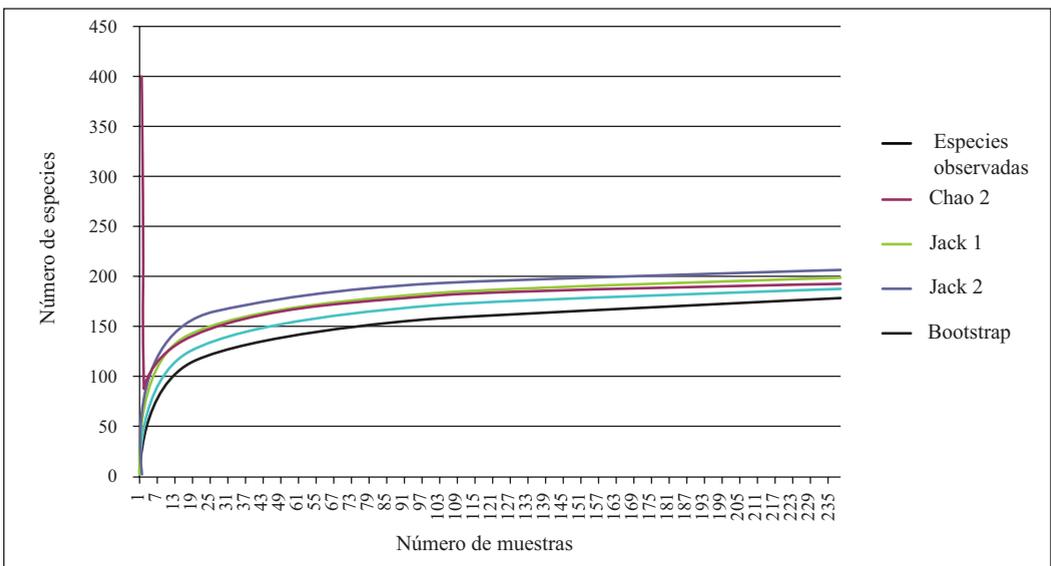


Figura 1. Curva de acumulación de especies observadas (Sobs) y estimadas (ACE, Chao2, Jack 1, Bootstrap) de la avifauna registrada para la Reserva Planalto.

Tabla 1. Aves de la Reserva Forestal Protectora Planalto.

Taxon		CT	Taxon		CT
Tinamidae			29	<i>Crotophaga ani</i>	
1	<i>Crypturellus soui</i>		30	<i>Tapera naevia</i>	
Cracidae			Strigidae		
2	<i>Ortalis columbiana</i>	[E]	31	<i>Megascops choliba</i>	[CITES II]
Phalacrocoracidae			32	<i>Pulsatrix perspicillata</i>	
3	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	[1, 2]	33	<i>Ciccaba virgata</i>	[1, 2] [CITES II]
Ardeidae			Nyctibiidae		
4	<i>Butorides striata</i>		34	<i>Nyctibius griseus</i>	
5	<i>Bubulcus ibis</i>	[1]	Caprimulgidae		
Threskiornithidae			35	<i>Nyctidromus albicollis</i>	
6	<i>Phimosus infuscatus</i>	[1, 2]	Apodidae		
Cathartidae			36	<i>Streptoprocne rutila</i>	
7	<i>Cathartes aura</i>		37	<i>Streptoprocne zonaris</i>	
8	<i>Coragyps atratus</i>		38	<i>Panyptila cayennensis</i>	
Pandionidae			Trochilidae		
9	<i>Pandion haliaetus</i>	[1] [M]	39	<i>Florisuga mellivora</i>	[CITES II]
Accipitridae			40	<i>Eutoxeres aquila</i>	[CITES II]
10	<i>Gampsonyx swainsonii</i>		41	<i>Glaucis hirsutus</i>	
11	<i>Ictinia plumbea</i>		42	<i>Phaethornis striigularis</i>	[CITES II]
12	<i>Rupornis magnirostris</i>		43	<i>Phaethornis guy</i>	[CITES II]
13	<i>Buteo platypterus</i>	[M]	44	<i>Colibri coruscans</i>	[CITES II]
14	<i>Buteo brachyurus</i>		45	<i>Anthracothorax nigricollis</i>	[CITES II]
15	<i>Buteo swainsoni</i>	[M, CITES II]	46	<i>Heliomaster longirostris</i>	[CITES II]
Rallidae			47	<i>Chaetocercus mulsant</i>	[CITES II]
16	<i>Aramides cajaneus</i>	[1, 2]	48	<i>Chlorostilbon mellisugus</i>	[CITES II]
17	<i>Porphyrio martinicus</i>	[1]	49	<i>Chalybura buffonii</i>	[CITES II]
Charadriidae			50	<i>Amazilia tzacatl</i>	[CITES II]
18	<i>Vanellus chilensis</i>		51	<i>Amazilia franciae</i>	[CITES II, CE]
Scolopacidae			52	<i>Amazilia saucerrottei</i>	[CITES II]
19	<i>Actitis macularius</i>	[M]	Alcedinidae		
Columbidae			53	<i>Megaceryle torquata</i>	
20	<i>Columbina talpacoti</i>	[1]	Momotidae		
21	<i>Patagioenas cayennensis</i>	[1]	54	<i>Momotus aequatorialis</i>	
22	<i>Zenaida auriculata</i>		Bucconidae		
23	<i>Leptotila verreauxi</i>		55	<i>Malacoptila mystacalis</i>	
24	<i>Leptotila plumbeiceps</i>		Ramphastidae		
Cuculidae			56	<i>Aulacorhynchus haematopygus</i>	
25	<i>Coccyzua minuta</i>		Picidae		
26	<i>Coccyzua pumila</i>		57	<i>Picumnus granadensis</i>	[E]
27	<i>Piaya cayana</i>		58	<i>Melanerpes formicivorus</i>	
28	<i>Coccyzus americanus</i>	[M]	59	<i>Melanerpes rubricapillus</i>	[1]

Continúa...

...continuación

Taxon	CT	Taxon	CT
60 <i>Picoides fumigatus</i>		95 <i>Poecilatriccus sylvia</i>	
61 <i>Veniliornis dignus</i>		96 <i>Todirostrum cinereum</i>	
62 <i>Colaptes rubiginosus</i>		97 <i>Tolmomyias sulphurescens</i>	
63 <i>Colaptes punctigula</i>		98 <i>Myiophobus fasciatus</i>	
64 <i>Dryocopus lineatus</i>		99 <i>Myiobius atricaudus</i>	
Falconidae		100 <i>Empidonax</i> sp.	[M]
65 <i>Herpotheres cachinnans</i>	[CITES II]	101 <i>Contopus cooperi</i>	[M]
66 <i>Milvago chimachima</i>	[CITES II]	102 <i>Contopus</i> sp.	[M]
Psittacidae		103 <i>Sayornis nigricans</i>	
67 <i>Forpus conspicillatus</i>	[CITES II]	104 <i>Pyrocephalus rubinus</i>	
68 <i>Bolborhynchus lineola</i>	[1] [CITES II]	105 <i>Fluvicola pica</i>	
69 <i>Pionus menstruus</i>	[CITES II]	106 <i>Machetornis rixosa</i>	
70 <i>Pionus chalcopterus</i>	[CITES II]	107 <i>Myiozetetes cayanensis</i>	
71 <i>Amazona ochrocephala</i>	[1, 2] [CITES II]	108 <i>Pitangus sulphuratus</i>	
Thamnophilidae		109 <i>Myiodynastes maculatus</i>	
72 <i>Taraba major</i>		110 <i>Tyrannus melancholicus</i>	
73 <i>Thamnophilus multistriatus</i>	[CE]	111 <i>Tyrannus tyrannus</i>	
74 <i>Dysithamnus mentalis</i>		112 <i>Myiarchus tuberculifer</i>	
75 <i>Myrmotherula schisticolor</i>		113 <i>Cf Myiarchus crinitus</i>	
76 <i>Cercomacra parkeri</i>	[E]	Tityridae	
77 <i>Cercomacra nigricans</i>		114 <i>Pachyramphus rufus</i>	
78 <i>Myrmeciza immaculata</i>		Vireonidae	
Grallariidae		115 <i>Vireo leucophrys</i>	
79 <i>Grallaria guatimalensis</i>	[1]	116 <i>Vireo olivaceus olivaceus</i>	
Rhinocryptidae		117 <i>Vireo olivaceus chivi</i>	
80 <i>Scytalopus atratus</i>		118 <i>Hylophilus semibrunneus</i>	
Furnariidae		Corvidae	
81 <i>Dendrocincla fuliginosa</i>		119 <i>Cyanocorax affinis</i>	
82 <i>Xiphorhynchus susurrans</i>		Hirundinidae	
83 <i>Lepidocolaptes souleyetii</i>		120 <i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	
84 <i>Lochmias nematura</i>		121 <i>Stelgidopteryx ruficollis</i>	
85 <i>Synallaxis albescens</i>		Troglodytidae	
86 <i>Synallaxis brachyura</i>		122 <i>Microcerculus marginatus</i>	
Tirannidae		123 <i>Troglodytes aedon</i>	
87 <i>Elaenia flavogaster</i>		124 <i>Pheugopedius mystacalis</i>	
88 <i>Camptostoma obsoletum</i>		125 <i>Pheugopedius sclateri</i>	
89 <i>Serpophaga cinerea</i>		126 <i>Henicorhina leucosticta</i>	
90 <i>Phaeomyias murina</i>		Poliopitidae	
91 <i>Zimmerius chrysops</i>		127 <i>Ramphocaenus melanurus</i>	
92 <i>Mionectes oleagineus</i>		128 <i>Poliopitila plumbea</i>	
93 <i>Leptopogon superciliaris</i>		Turdidae	
94 <i>Lophotriccus pileatus</i>		129 <i>Catharus aurantiirostris</i>	

Continúa...

...continuación

Taxon	CT	Taxon	CT
130 <i>Catharus ustulatus</i>	[M]	Cardinalidae	
131 <i>Turdus grayi</i>		157 <i>Piranga flava</i>	
132 <i>Turdus ignobilis</i>		158 <i>Piranga rubra</i>	[M]
Thraupidae		159 <i>Piranga olivacea</i>	[M]
133 <i>Tachyphonus luctuosus</i>		160 <i>Pheucticus ludovicianus</i>	[M]
134 <i>Ramphocelus dimidiatus</i>		Parulidae	
135 <i>Ramphocelus flammigerus</i>		161 <i>Leiothlypis peregrina</i>	[M]
136 <i>Thraupis episcopus</i>		162 <i>Setophaga pititayumi</i>	
137 <i>Thraupis palmarum</i>		163 <i>Setophaga petechia</i>	[M]
138 <i>Tangara vitriolina</i>	[CE]	164 <i>Setophaga castanea</i>	[M]
139 <i>Tangara cyanicollis</i>		165 <i>Setophaga fusca</i>	[M]
140 <i>Tangara gyrola</i>		166 <i>Setophaga cerulea</i>	[M - VU]
141 <i>Tangara arthus</i>		167 <i>Setophaga ruticilla</i>	[M]
142 <i>Chlorophanes spiza</i>		168 <i>Mniotilta varia</i>	[M]
143 <i>Sicalis flaveola</i>		169 <i>Protonotaria citrea</i>	[M]
144 <i>Volatinia jacarina</i>	[1]	170 <i>Parkesia noveboracensis</i>	[M]
145 <i>Sporophila schistacea</i>		171 <i>Oporornis philadelphia</i>	[M]
146 <i>Sporophila intermedia</i>		172 <i>Cardellina canadensis</i>	[CA] [M]
147 <i>Sporophila nigricollis</i>		173 <i>Myioborus miniatus</i>	
148 <i>Sporophila minuta</i>		174 <i>Basileuterus culicivorus</i>	
149 <i>Oryzoborus funereus</i>		175 <i>Phaeothlypis fulvicauda</i>	
150 <i>Coereba flaveola</i>		Icteridae	
151 <i>Tiaris olivaceus</i>		176 <i>Cacicus cela</i>	
Clasificación incierta		177 <i>Icterus chrysater</i>	[1]
152 <i>Saltator atripennis</i>		178 <i>Icterus galbula</i>	[M]
153 <i>Saltator striatipectus</i>		179 <i>Molothrus bonariensis</i>	
Emberizidae		Fringillidae	
154 <i>Zonotrichia capensis</i>		180 <i>Sporagra xanthogastra</i>	[1]
155 <i>Arremon brunneinucha</i>		181 <i>Astragalinus psaltria</i>	
156 <i>Atlapetes albinucha</i>		182 <i>Euphonia laniirostris</i>	
		183 <i>Euphonia cyanocephala</i>	

Esta lista sigue la clasificación taxonómica propuesta por The American Ornithologists' Union (35). En ella se indican algunas características (CT) de las especies: Migratorias (M), Endémicas (E), Casi endémicas (CE), especies en categorías Vulnerable (VU) y Casi amenazada (NT) en la lista de especies en algún grado de amenaza de la UICN (37), y especies protegidas por el CITES en Colombia. [CA]: especie clasificada como amenazada por el COSEWIC, del gobierno de Canadá. Además se señala [1] para las especies nuevas para Planalto, y [2] para aquellas que son nuevas para el municipio.

La presencia en Planalto de la gran mayoría de las especies en esta lista (167 especies) había sido reportada en la literatura (2, 38); sin embargo, la lista incluye 17 nuevos reportes, de los cuales cinco son nuevos registros para el municipio de

Manizales: *Phalacrocorax brasilianus*, *Aramides cajanea*, *Phimosus infuscatus*, *Amazona ochrocephala* y *Ciccaba virgata*. Varios de los registros nuevos para Planalto son de especies, relativamente comunes, pero que su presencia no había sido registrada

en los inventarios, como *Bubulcus ibis*, *Columbina talpacoti*, *Patagioenas cayennensis* y *Melanerpes rubricapillus*. Dos especies acuáticas, *Phalacrocorax brasilianus* y *Phimosus infuscatus* se han vuelto comunes y abundantes en años recientes y su presencia ha sido registrada en las orillas del río Chinchiná e incluso en los pastizales y jardines en Planalto. *Bolborhynchus lineola*, una especie de loro (Fam. Psittacidae), fue observada solamente durante un corto período, entre el 18 y 21 de mayo de 2010. En esa ocasión, un grupo de cerca de 15 individuos fue observado alimentándose de semillas de guadua (*Guadua agustifolia*) cerca al edificio central. De hecho, esta especie de loro parece estar estrechamente asociada a las producciones de semillas de miembros de la familia de las guadas y chusques (16, 29), que ocurren en forma gradual y esporádica (16, 19). En este caso, su registro en Planalto, a 1.300 m de altitud, representa una ampliación del rango altitudinal conocido para esta especie en Colombia a menores altitudes (14). El registro de la especie de búho, *Ciccaba virgata*, es nuevo para Planalto y para el municipio de Manizales. Un individuo ha sido escuchado en las noches en los guaduales cerca al edificio número 1. Debido a sus hábitos nocturnos, esta especie no es fácilmente observable; su canto delata su presencia. *Grallaria guatimalensis*, una especie de tororoí que ha sido registrado en varias localidades del municipio de Manizales (11), fue escuchado por primera vez en Planalto en marzo del 2009. Un individuo aún se escucha en las cercanías al edificio número 2. La especie de lora *Amazona ochrocephala* solo ha sido vista en una ocasión: cerca de la entrada a Cenicafé, el 1 de mayo de 2012. Aunque esta especie no ha sido reportada en la literatura científica para el municipio de Manizales,

en varias ocasiones se han observado varios individuos en la zona cálida de la vereda Kilómetro 41, cerca al río Cauca¹.

Familias. Las 183 especies registradas para la Reserva Planalto corresponden a 42 familias (Figura 2). Tyrannidae fue la familia con el mayor número de especies (29 especies), seguida de Thraupidae (19 especies), Parulidae (15 especies) y Trochilidae (14 especies). Las demás familias incluyen menos de diez especies. Además, 17 familias solamente están representadas por una especie. La lista también incluye dos especies del género *Saltator*; cuya clasificación taxonómica es incierta (35), es decir, que debido a que su filogenia no ha sido aún esclarecida, en la actualidad no están incorporadas a ninguna familia.

Especies amenazadas. Teniendo en cuenta las categorías de amenaza, propuestas por La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (37), en Planalto se encuentran dos especies migratorias boreales consideradas como amenazadas a nivel mundial (Tabla 3): *Setophaga cerulea* clasificada como “vulnerable” (VU), porque se considera que enfrenta un moderado riesgo de extinción o disminución de sus poblaciones a mediano plazo, y *Contopus cooperi* clasificada como “casi amenazada” (NT), lo que significa que está cercana a calificar como vulnerable. *S. cerulea* fue registrada en ocho oportunidades, mientras que de *C. cooperi* se obtuvieron siete registros. Además, 21 especies han sido incluidas en el Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres, CITES (18). Este apéndice incluye especies que no se clasifican necesariamente en peligro de extinción, pero cuyo comercio debe controlarse con el fin de evitar una utilización incompatible con su supervivencia (33).

¹ Ute Teske y María T. Jaramillo comunicación personal.

En Planalto no se han registrado especies de aves en alguna categoría de amenaza, según el libro rojo de aves de Colombia (28).

Especies migratorias. Se identificaron 26 especies migratorias, que corresponden al 14,2% del total de especies registradas en la Reserva de Planalto. Todas las especies migratorias registradas para Planalto corresponden al grupo de las neárticas o boreales, cuya cronología de migración generalmente se extiende desde septiembre a abril de cada año. Entre las especies migratorias no gregarias sobresalen como las más abundantes *Piranga rubra*, *Catharus ustulatus*, *Cardellina canadensis*, *Setophaga petechia*, *Geothlypis philadelphia* y *Setophaga ruticilla* (4). Por el contrario, *Protonotaria citrea* e *Icterus galbula* solamente fueron observadas en una ocasión, cada una. Varios grupos o bandadas del gavilán migratorio, *Buteo platypterus*, han sido observados en el mes de octubre cuando reiniciaban su viaje migratorio, después de una noche de descanso en Planalto; esta especie viaja en bandadas, a veces numerosas. El águila pescadora migratoria *Pandion haliaetus* tiene un solo registro, de un individuo que durmió en Planalto en su viaje migratorio. Entre las migratorias se destaca la presencia de *Setophaga cerulea* y *Contopus cooperi*, especies que han sido clasificadas con algún grado de amenaza (37) y *Cardellina Canadensis* que ha sido catalogada como especie "amenazada" por el Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada, COSEWIC.

El número total de especies migratorias registradas mensualmente varió entre un mínimo de 11 especies, en septiembre cuando las migratorias hacen su arribo a Colombia, y un máximo de 17 especies en diciembre (Tabla 2). Siete especies migratorias han sido registradas en los ocho meses del período migratorio. Otras siete especies han sido

observadas entre cuatro y siete meses. Seis especies han sido observadas en sólo un mes del año. No hubo registro de especies entre mayo y agosto. Solamente dos especies fueron registradas al final de la migración: *Piranga olivacea*, únicamente se registró en abril y *Coccyzus americanus* en marzo y abril. Es posible que la presencia de estas especies en Planalto se deba a que ambas son transeúntes en esta región (14) y usan la Reserva como una escala en el viaje de migración, desde zonas más al sur hacia el norte. *Actitis macularius*, una especie muy común en la región durante toda la época de migración, fue registrada en muy pocas ocasiones, posiblemente porque la reserva carece de humedales adecuados para esa especie de hábitats acuáticos.

Especies endémicas y casi endémicas.

Entre la avifauna registrada para Planalto se reportaron *Picumnus granadensis*, *Ortalis colombiana* y *Cercomacra parkeri* especies de aves endémicas de Colombia, cuya distribución espacial se limita exclusivamente a este país (36). También se identificaron tres especies casi endémicas, que son aquellas cuya distribución incluye primordialmente el territorio Colombiano, pero también incluye porciones de otros países vecinos a Colombia (36). Estas fueron *Amazilia franciae*, presente en Colombia, Ecuador y Perú; *Tangara vitriolina* presente en Colombia y Ecuador; y *Thamnophilus multistriatus*, presente en Colombia y Venezuela (14, 15).

DISCUSIÓN

La lista de especies de aves presentada en la Tabla 1, se constituye en la primera lista publicada para la Reserva de Planalto. Por lo tanto, es un trabajo de referencia y una contribución al conocimiento sobre la biodiversidad regional. Además, incluye el registro de 16 especies nuevas para Planalto,

Tabla 2. Presencia mensual de las especies migratorias en la reserva de Planalto.

Especie	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
<i>Actitis macularius</i>				-	-							
<i>Buteo platypterus</i>		-		-			-					
<i>Buteo swainsoni</i>		-										
<i>Catharus ustulatus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-				
<i>Coccyzus americanus</i>							-	-				
<i>Contopus cooperi</i>	-		-	-	-							
<i>Contopus spp.(migratorio)</i>	-			-								
<i>Setophaga castanea</i>				-				-				
<i>Setophaga cerulea</i>		-	-	-	-							
<i>Setophaga fusca</i>		-	-	-	-	-	-	-				
<i>Dendroica petechia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-				
<i>Empidonax spp. (migratorio)</i>		-	-	-	-	-	-	-				
<i>Icterus galbula</i>					-							
<i>Leiothlypis peregrina</i>	-			-		-	-	-				
<i>Mniotilta varia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-				
<i>Geothlypis philadelphia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-				
<i>Pandion haliaetus</i>		-										
<i>Parkesia noveboracensis</i>	-	-	-	-	-	-						
<i>Pheucticus ludovicianus</i>		-	-	-	-	-	-					
<i>Piranga olivacea</i>												-
<i>Piranga rubra</i>	-	-	-	-	-	-	-	-				
<i>Protonotaria citrea</i>				-								
<i>Setophaga ruticilla</i>	-	-	-	-	-	-	-	-				
<i>Tyrannus tyrannus</i>												-
<i>Vireo olivaceus olivaceus</i>	-		-	-			-	-				
<i>Cardellina canadensis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-				
Número de especies	12	15	14	19	16	12	14	15	0	0	0	0

cuatro de las cuales también son nuevos registros para el municipio de Manizales.

Aunque la lista es el resultado de un esfuerzo de muestreo significativo, que incluye más de 9.500 registros ornitológicos, los análisis posibles son limitados, debido a que se ha recopilado la información proveniente de diferentes estudios, en los cuales se usaron diferentes métodos de muestreo y en diferentes períodos de tiempo. Además, la intensidad de muestreo no ha sido la misma en los diferentes

hábitats presentes en la reserva ni en todos los meses del año. Como ya se ha indicado, las zonas boscosas de las partes más altas y menos accesibles han sido muestreadas con mucha menos intensidad que las partes bajas, como es el sector de La Granja.

La rica diversidad de aves que se logra como resultado de la compilación de estudios puede ser interpretada como dos caras de una moneda. Por un lado, ratifica la importancia de Planalto tanto

en el contexto municipal como en el regional. Pero también confirma el efecto negativo del grado de alteración de los hábitats naturales en la región y la urgente necesidad de actuar en diferentes campos y a diferentes escalas espaciales, para promover los procesos de restauración de la biodiversidad.

La rica diversidad de aves en Planalto puede deberse en parte a la heterogeneidad de hábitats presentes. La existencia de parches de bosque en diferente estado de sucesión, guadales, rastrojos, cañadas, orillas de río, cercas vivas, jardines y cafetales con sombra y a libre exposición, estarían generando diversos hábitats que proporcionan refugio y alimento para muchas especies. Además, el grado de protección que han recibido tanto las aves como los hábitats naturales posiblemente ha reducido las amenazas a las especies y ha fomentado no solo la protección de los parches de bosque originalmente existentes, sino también los procesos de regeneración natural alrededor de esos parches.

En el contexto regional, Planalto ha adquirido una importancia especial: es una de las pocas áreas naturales boscosas en la zona premontana, por debajo de 2.000 m, no solo en el municipio de Manizales (5), sino también en la parte media de la cuenca del río Cauca (Caldas, Risaralda y Quindío) (25). Además, es una de las pocas áreas de reserva en ese piso térmico, a la que se le ha otorgado la protección formal que representa la categoría de “Reserva forestal protectora”, lo que significa que aunque Planalto es un área de propiedad privada, su futuro en conservación puede estar asegurado. Además, Cenicafé ha venido avanzando en la formulación y aplicación de un plan de manejo y conservación de la biodiversidad en Planalto, como parte del sistema de gestión integrado.

Aunque se ha confirmado que existe una rica diversidad de aves en Planalto y que esta riqueza puede ser considerada como un indicador del aporte de la Reserva a la biodiversidad regional, no es el mejor indicador del estado de las comunidades ecológicas ni de su equivalencia (26). En el análisis del estado de la Reserva de Planalto no sólo se debe considerar su riqueza ornitológica, es decir, el número total de especies, sino también la composición de esa comunidad o ensamblaje. Por ejemplo, un área en la cual 30 especies de bosque han sido reemplazadas por 30 especies de áreas abiertas, tiene la misma riqueza de un área boscosa, pero no es comparable en términos ecológicos (27).

En Planalto se han reportado algunos grupos de aves que son considerados buenos indicadores ambientales, como son las especies de las familias Furnariidae (de la cual se ha confirmado la presencia de seis especies) y Formicariidae (siete especies), que parecen presentar dependencia de los hábitats boscosos (17, 34). Sin embargo, están ausentes muchas aves especialistas de bosques, como por ejemplo, las especie frugívoras, de las cuales se dice que el tamaño corporal está asociado a la vulnerabilidad, como sería el caso de ciertas especies de tamaños mayores de las familias Psittacidae, Ramphastidae y Cracidae (18). A excepción de *Ortalis colombiana*, una especie de pava (Fam. Cracidae), presente en varias localidades cercanas en el municipio de Manizales, no se ha registrado algún otro miembro de esa familia, ni alguna de las especies de aves rapaces de bosque (Fams. Accipitridae y Falconidae). Tampoco se han encontrado especies clasificadas como amenazadas, las cuales sí han sido registradas en otros fragmentos de bosque en la zona cafetera de la cuenca media del río Cauca (25), como la perdiz de bosque *Odontophorus hyperythrus* o el *Chloropipo flavicapilla*, una especie de saltarín que además

de ser endémico para Colombia y Norte del Ecuador, ha sido catalogada como una especie casi amenazada (28). La ausencia de esas especies evidencia el empobrecimiento de la avifauna de Planalto.

El empobrecimiento de la avifauna en Planalto puede deberse a las características mismas de la reserva, pero también a las características del contexto regional. Planalto, con solo 101 hectáreas de área total es una reserva de tamaño reducido y, por lo tanto, con la posibilidad de albergar un número reducido de especies de aves. Además, debido al tamaño reducido de los parches de bosque y a que en algunos sectores el proceso de sucesión no ha avanzado en forma satisfactoria, posiblemente debido a la reducción del banco de semillas o al efecto de gramíneas, la avifauna no incluye muchos de los especialistas de bosque originarios de esta región.

Su condición de aislamiento de otros fragmentos de bosque, en una matriz dominada por otros usos del suelo o coberturas no boscosas (5), también puede tener un efecto negativo en la avifauna de la Reserva. Planalto no está conectada con las masas boscosas en la parte alta de la cordillera Central, como las de río Blanco o el área de amortiguación del Parque Nacional Natural los Nevados. Tampoco lo está con otros fragmentos de bosque en la región, como es el caso del bosque de la finca Playa Rica Villegas, a solo 2 km de distancia. Esa falta de conectividad también puede influir en la riqueza de la avifauna y especialmente en la presencia de especies propias de bosques, que son precisamente las que tienen prioridad de conservación en esta zona.

Estrategias de conservación. Los resultados de esta caracterización de la avifauna de Planalto sirven para valorar su aporte a la

biodiversidad local y regional, y para identificar acciones a favor de la conservación. Es necesario actuar desde diferentes frentes y a diferentes escalas espaciales. La condición de Reserva Forestal Protectora implica la formulación y ejecución de un plan de manejo y conservación de la reserva y de la fauna presente, el cual debe incluir un plan de acción en actividades en: (a) Conservación, (b) Restauración, recuperación y control, (c) Investigación, (d) Educación ambiental y (e) Cultura y ecoturismo. Este plan de manejo de Planalto deberá incluir la zonificación de la Reserva, en la cual se definirán las zonas de preservación, restauración y de uso público.

Es necesario avanzar en el programa de restauración, promoviendo la sucesión natural en sectores de rastrojo y especialmente en las áreas dominadas por gramíneas, como en las laderas del sector Occidental. Por medio de un programa de reforestación con especies arbóreas nativas sería posible aumentar la sombra y de esta manera eliminar las gramíneas y a la vez enriquecer la flora arbórea de esos sectores. Convendría avanzar también en el enriquecimiento de la conectividad de Planalto con su alrededor, por medio de un sistema de cercas vivas, un aumento en la cobertura arbórea y la protección de los pocos parches de guaduales y rastrojos que existen en los alrededores. La conexión con el bosque de Playa Rica Villegas, situado al Norte de la Reserva, podría ser de valor especial para la biodiversidad. Estas acciones deberán ser concertadas con los vecinos de Planalto. Además, se debe continuar con la prohibición y control de la cacería y captura de especies para comercio y la liberación de fauna decomisada y con el control a la presencia de perros y gatos domésticos.

Sería conveniente obtener y asignar recursos para avanzar en el campo de la investigación en Planalto. Estudios sobre la ecología de

las especies de aves y sobre el estado de las poblaciones de los especialistas de bosque y de las especies con mayores sensibilidades a los disturbios serían de interés y utilidad para la conservación. Se deben también considerar herramientas económicas y legales para promover la conservación de Planalto. El fortalecimiento del papel de la Reserva en el contexto de los sistemas Municipal y Regional de Áreas Protegidas (SIMAP y SIRAP) podría traer beneficios legales, que permitan obtener recursos económicos para el desarrollo de los programas de conservación y restauración. Se podría además, considerar anexar a Planalto a la Red de Reservas de la Sociedad Civil, para promover su reconocimiento a nivel nacional y lograr los beneficios adquiridos por la Red para sus afiliados.

La lista de especies de aves aquí presentada, se convierte en una valiosa línea base que permitirá monitorear los avances en los programas de conservación y restauración en la reserva. Los censos navideños de aves que se realizan anualmente con la colaboración de la SCO, en los cuales solamente se cubre el sector de La Granja, tienen valor como parte de un programa de monitoreo. Sin embargo, es importante fortalecer el programa de monitoreo, avanzando primero en la construcción de la línea base en otros grupos taxonómicos y realizando censos o inventarios periódicos de esos grupos. Éstas son medidas básicas necesarias como parte del plan de manejo y conservación de la biodiversidad en Planalto.

AGRADECIMIENTOS

A Catalina Casas, Juan C. Verhelst y a John Harold Castaño por los comentarios a este manuscrito, al doctor Bruce Aitken por sus sugerencias al abstract y a la SCO por permitimos utilizar la información de los censos navideños.

LITERATURA CITADA

1. BOTERO, J.E. El crítico estado de nuestras valiosas ecorregiones. *Estudios Regionales, Revista CRECE* 7:70-76. 1997.
2. BOTERO, J.E.; LENTIJO J., G.M.; LÓPEZ, A.M.; CASTELLANOS, O.; ARISTIZÁBAL, C.; FRANCO N.; ARBELÁEZ, D. Adiciones a la lista de aves del Municipio de Manizales. *Boletín SAO* 15(2):69-88. 2005.
3. BOTERO, J.E., VERHELST, J.C.; FAJARDO, D. Las Aves de la Zona Cafetera de Colombia. *Avance Técnico* 265, Cenicafé. 1999. 8 pp. a
4. BOTERO, J.E.; VERHELST, J.C.; FAJARDO, D. Las Aves Migratorias en Zona Cafetera Colombiana. *Avance Técnico* 266, Cenicafé. 1999. 8 pp.
5. BOTERO, J.E.; VERHELST, J.C.; ORREGO, O.; PFEIFER, A.M.; PULIDO, F.; RODRÍGUEZ, J.C.; LÓPEZ, J.A.; FRANCO, V.M. La biodiversidad en el municipio de Manizales: inventario y diagnóstico del patrimonio biótico. *Informe Técnico. Cenicafé – Alcaldía de Manizales.* 2001
6. CARIGNAN, V.; VILLARD, M.A. Selecting indicator species to monitor ecological integrity: a review. *Environmental Monitoring and Assessment* 78: 45-61. 2002.
7. CASTAÑO, J. H.; BOTERO, J. E.; VELÁSQUEZ, S.; CORRALES, J. D. Murciélagos en agroecosistemas cafeteros de Colombia. *Chiróptera Neotropical* 10(1-2):196-199. 2004.
8. CASTAÑO, J. H.; MUÑOZ-SABA, Y.; BOTERO, J. E.; VÉLEZ, J. H. Mamíferos del Departamento de Caldas, Colombia. *Biota Colombiana* 4(2):247-259. 2003.
9. CORPOCALDAS; ASOCIACIÓN CALIDRIS. Estado de conocimiento de las aves en el departamento de Caldas: Prioridades de conservación y vacíos de información. *Corporación Autónoma Regional de Caldas, Manizales.* 2010. 105 p.
10. DINERSTEIN, E.; OLSON, D.M.; GRAHAM, D.J.; WEBSTER, A.L.; PRIMM, S.A.; BOOKBINDER, M.P.; LEDEC, G. A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean. *Banco Mundial y Fondo Mundial para la Naturaleza, Washington, D.C.* 1995.
11. DURÁN, S. M.; LENTIJO, G.; LÓPEZ, A. M.; BOTERO, J. E. Nuevos registros de la distribución

- y uso de hábitat del Tororoi Dorsiescamado (*Grallaria guatemalensis*) en Colombia. *Ornitología Neotropical* 20:285-290. 2008.
12. GIL, Z.N.; POSADA, F.J. 2000. Las mariposas como indicadores de la biodiversidad de la zona cafetera colombiana. Poster presentado en el foro internacional Café y Biodiversidad, realizado en Cenicafé, agosto de 2000.
 13. GIL, Z.N.; POSADA, F.J. 2000. Registro de chisas mediante trampas luminosas y susceptibilidad a hongos entomopatógenos. In: Resúmenes XXVII Congreso de la Sociedad Colombiana de Entomología, Socolen, julio 26, 27, y 28 de 2000. Medellín, Antioquia.
 14. HILTY, S. L.; BROWN, W. L. A Guide to the Birds of Colombia. University of Princeton Press, Princeton, New Jersey. 1986.
 15. INFONATURA. Animals and Ecosystems of Latin America [En línea]. Virginia (USA). NatureServe. 2007. Version 5.0. Available: <http://www.natureserve.org/infonatura>. (Consultado enero de 2012).
 16. JUDZIEWICZ, E.; LYNN, J.; CLARK, G.; LONDOÑO DE LAPAVA, X.; STERN, M. J. American Bamboos. Smithsonian Institution, Estados Unidos 1999.
 17. KATTAN, G. H. Rarity and Vulnerability: The birds of the Cordillera Central of Colombia. *Conservation Biology* 6 (1): 64-70. 1992.
 18. KATTAN, G. H.; ÁLVAREZ-LÓPEZ, H.; GIRALDO, M. Forest fragmentation and bird extinctions: San Antonio eighty years later. *Conservation Biology* 8 (1): 138-146. 1994.
 19. LONDOÑO DE LA PAVA, X. "Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del Nuevo mundo". En: *Colombia Cespedia* 19(62-63):87-132. 1992
 20. LÓPEZ-VAAMONDE, C.; CÁRDENAS, R. 2002. Composición faunística de las comunidades de mariposas diurnas de un bosque subandino tropical, Colombia, (Lepidoptera: Rhopalocera). Parte I. En: *Boletín Científico, Centro de Museos, Museo de Historia Natural*. 6:45-72.
 21. LÓPEZ-VAAMONDE, C.; CÁRDENAS, R. 2002. Composición faunística de las comunidades de mariposas diurnas de un bosque subandino tropical, Colombia, (Lepidoptera: Rhopalocera). Parte II. En: *Boletín Científico, Centro de Museos, Museo de Historia Natural*. 7:157-177.
 22. LOZANO-ZAMBRANO, F. H. (ed.). Herramientas de manejo para la conservación de biodiversidad en paisajes rurales. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Bogotá, D. C.
 23. ORREGO, O. Briófitos de Caldas: La Reserva de Planalto. *Boletín Científico, Centro de Museos, Museo de Historia Natural* 9:31-50. 2005.
 24. ORREGO, O.; BOTERO, J. E.; VERHELST, J. C.; PFEIFER, A. M.; LÓPEZ, J. A.; FRANCO, V. M.; VÉLEZ, J. G. Plantas vasculares del Municipio de Manizales, Caldas, Colombia. *Boletín Museo Historia Natural Universidad de Caldas* 8:61-106. 2004.
 25. ORREGO, O.; CASTAÑO, J. H.; LÓPEZ, A. M. Efecto de la fragmentación de los bosques en la zona cafetera sobre la diversidad genética de poblaciones de flora y fauna silvestre. Informe Programa Biología de la Conservación, Cenicafé. Manizales. 2004.
 26. RAPPOLE, J. H.; MORTON, E. S. 1985. Effects of habitat alteration on a tropical avian forest community, p. 1013-1021. In P. A. Buckley, E. S. Morton, R. Ridgely & F. G. Buckley (eds.). *Neotropical Ornithology. Ornithological Monographs* 36.
 27. RAPPOLE, J. H.; KING, D. I.; RIVERA, J. H. Coffee and Conservation. *Conservation Biology* 17 (1): 334-336. 2003.
 28. RENJIFO, L. M.; FRANCO-MAYA, A. M.; AMAYA-ESPINEL, J. D.; KATTAN, G. H.; LÓPEZ-LANÚS, B. Libro rojo de aves de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Instituto del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia. 2002. Pp. 562.
 29. RESTALL, R.; RODNER, C.; LENTINO, M. Birds of Northern South America (Vols. 1 y 2). Yale University Press. New Haven y London. 2006.
 30. RESTREPO DE FRAUME, M. Áreas de interés ambiental rural. Informe para el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales. Fase III. Manizales. 1998. 70 pp.
 31. RESTREPO DE FRAUME, M.; ÁLVAREZ, L. M.; ARANGO, L. G.; MAYA, L. A. Fitografía del ecosistema de Cenicafé. Universidad de Caldas y Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Manizales. 1994.
 32. RIVAS, C. Propuesta plan de manejo ambiental Reserva Forestal Protectora Planalto. Cenicafé. Manizales.

Trabajo de grado. Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Medellín. 2007.

de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, PNUMA, Ministerio de Medio Ambiente. Bogotá.

33. RODA, J.; FRANCO, A.M.; BAPTISTE, M. P.; MÚNERA, C.; GÓMEZ D.M. Manual de identificación CITES de aves de Colombia. Serie Manuales de Identificación CITES de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia. Pp. 352. 2003.
34. SEKERCIOGLU, C. H. Forest fragmentation hits insectivorous birds hard. *Directions in Science* 1: 62-64. 2002.
35. SOUTH AMERICAN CLASSIFICATION COMMITTEE, AMERICAN ORNITHOLOGISTS' UNION (AOU). A Classification of the bird species of South America. [En línea]. Versión (Abril 12 de 2012). <http://www.museum.isu/~Remsen/SACCBaseline.html>. (Consultado 22 de julio de 2013).
36. STILES, F.G. 1998. Aves endémicas de Colombia. Pp 378-385, 428-432. En: Informe Nacional Sobre el Estado de la Biodiversidad en Colombia (Vol. I) M.E. Chaves y N.Arango (Eds.). Instituto de Investigación
37. UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA (UICN). The IUCN Red List of Threatened Species. [En línea]. Versión (2011.2). Available: <http://www.iucnredlist.org/>. (Consultado enero de 2012).
38. VERHELST, J. C.; RODRÍGUEZ, J. C.; ORREGO, O.; BOTERO, J. E.; LÓPEZ, J. A.; FRANCO, V. M.; PFEIFER, A.M. Aves del Municipio de Manizales-Caldas, Colombia. *Biota Colombiana* 2(3): 265-284. 2001.
39. VERHELST, J.C.; BOTERO, J.E.; FAJARDO, D. El Carpinterito Punteado, *Picumnus granadensis*, en las regiones cafeteras de Colombia. *Caldasia* 24(1):201-208. 2002.
40. VILLARREAL, H.; ÁLVAREZ, M.; CÓRDOBA, S.; ESCOBAR, F.; FAGUA, G.; GAST, F.; MENDOZA, H.; OSPINA, M.; UMAÑA, A.M. Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Segunda edición. Bogotá, Colombia. 2006. Pp. 236.

ESTIMACIÓN DE VALORES FALTANTES EN SERIES HISTÓRICAS DE BRILLO SOLAR

Rubén Darío Medina-Rivera*; Esther Cecilia Montoya-Restrepo*; Álvaro Jaramillo-Robledo**

RESUMEN

MEDINA R., R.D.; MONTOYA R., E.C.; JARAMILLO R., A. Estimación de valores faltantes en series históricas de brillo solar. Revista Cenicafé 63(1): 59-69 2012

Los registros de brillo solar en la red meteorológica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), son una de las fuentes para la realización de estudios climáticos, planificación en sistemas agrícolas y actividades de seguimiento para fundamentar la toma de decisiones en materia de recursos, costos de producción y establecimiento de política ambiental. En ocasiones no se tienen registros completos de brillo solar debido a mediciones inoportunas o errores en el cambio de la gráfica del heliógrafo. Con el fin de tener series históricas completas de brillo solar se evaluó el "método de la regresión acumulada" para estimar valores faltantes de estas series, en las estaciones de la red meteorológica de la FNC. Este método se basa en series de datos acumulados por ciclos, en períodos mensuales, teniendo en cuenta la agrupación por años dominados por los eventos climáticos de El Niño, La Niña y Neutro. Se obtuvo un error relativo promedio, estadísticamente inferior al 10%, cuando se estiman hasta diez datos faltantes para un mismo mes, independientemente del grupo, y un error relativo promedio, estadísticamente inferior al 6%, cuando se estiman hasta seis datos faltantes para un mismo mes de los grupos El Niño y Neutro. Para lograr estos errores de estimación, se requiere de series de brillo solar diario superiores a 25 años. El método de la regresión acumulada es flexible para estimar datos faltantes de horas de brillo solar, dado que se ajusta a las características propias de cada estación y su estimación depende única y exclusivamente de su historia.

Palabras clave: Red meteorológica, regresión acumulada.

ABSTRACT

Sunshine records obtained from the meteorological network of the National Federation of Coffee Growers of Colombia (FNC) are one of the sources used to conduct climate studies, agricultural planning, and follow-up actions to support decision-making regarding resources, production costs, and the establishment of an environmental policy. Sometimes you do not have complete sunshine records due to untimely measurement or to errors in the change of the heliograph graph. In order to have complete time series of sunshine, the "method of cumulative regression" was evaluated to estimate the missing values of these series in the meteorological network stations of the FNC. This method is based on a series of data gathered in monthly periods, taking into account the grouping into years dominated by the climatic events of El Niño, La Niña and Neutro. An average relative error, statistically less than 10% is obtained when up to ten missing data are estimated for a given month regardless of the group, and an average relative error, statistically less than 6% is obtained when up to six missing data are estimated for a given month of the El Niño and Neutro groups. To achieve these estimation errors, series of daily sunshine over 25 years are necessary. The cumulative regression method is versatile to estimate missing data in hours of sunlight since it fits the characteristics of each station and its estimation depends exclusively on its history.

Keywords: Meteorological network, cumulative regression.

* Investigador Científico I, Investigador Científico III, respectivamente, Disciplina de Biometría Cenicafé.

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

El servicio meteorológico de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), operado por Cenicafé, consciente de la necesidad de contar con información de calidad como factor clave para los estudios climáticos en las áreas donde se cultiva el café, y ante la dificultad de no tener siempre información completa de datos de precipitación, horas de brillo solar, temperatura, humedad del aire y evaporación, entre otros, establece la prioridad de disponer de un método con fundamento estadístico, para completar algunas de estas series históricas de clima. De las condiciones atmosféricas, interesa en este trabajo, especialmente la insolación, conocida como brillo solar, que se expresa como el número de horas en las cuales el sol brilla en un período de tiempo dado. Desde el punto de vista meteorológico el brillo solar es toda aquella radiación solar superior a 120 w.m^{-2} que tiene la capacidad de quemar el papel del heliógrafo (9).

La radiación solar es uno de los principales elementos que determina el microclima del cultivo, la productividad potencial del sistema, su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, de tal manera que su cantidad, el grado de interceptación y la eficiencia en su uso, son factores fundamentales en el crecimiento de las plantas (6).

Por lo anterior, tener series históricas completas de brillo solar, se convierte en una tarea imprescindible y más aún, cuando a lo largo del tiempo la pérdida de datos es un aspecto de difícil control. Esto hace que sea necesario tener procedimientos confiables, sin embargo, la elección del procedimiento para el manejo de datos incompletos resulta una tarea compleja, pues un mismo método, en determinadas situaciones, produce estimaciones precisas y en otras, no, esto sugiere a los

investigadores que, cuando manejen datos incompletos, valoren previamente el uso de más de una alternativa para tratarlos y realicen un análisis de sensibilidad que les permita una mejor selección del procedimiento a implementar (1).

Flores *et al.* (4), estudiaron en Honduras el comportamiento de brillo solar (heliofanía) y aunque el objetivo del estudio no fue el de estimar datos faltantes de brillo solar, los autores completaron para algunas estaciones, las series históricas de brillo solar, correlacionando las series de las estaciones con datos faltantes, con aquellas estaciones cercanas que tuvieran series extensas de datos completos y condiciones similares en cuanto a vegetación, posición geográfica y altura. Además, incluyeron registros de brillo solar de estaciones de países vecinos como El Salvador y Guatemala. Como consecuencia del control de calidad series no se tuvieron en cuenta las estaciones con un coeficiente de correlación menor a 0,81. En el estudio no se presentan los errores asociados a la estimación de datos faltantes con esta metodología.

Guzmán y Gómez (5), estudiaron las características del brillo solar a partir de los datos registrados durante 36 años (1956–1991), en dos estaciones climatológicas situadas en el municipio de Chinchiná, Caldas. A estas series anuales se les aplicó una prueba de rachas para verificar la homogeneidad de las series, encontrando una discontinuidad en éstas, lo cual se explica por el cambio en la metodología de evaluación de las bandas de brillo solar en 1972 por la OMM, de allí que se hiciera una nueva evaluación diaria de todos los heliogramas originales, de 1972 hacia atrás, con el fin de contar con series correctas y homogéneas. Para cada estación, se hizo el análisis descriptivo y de normalidad de las series tanto anual como mensual.

Para Colombia se encontraron 29 regiones de acuerdo con la distribución del brillo solar (3), las cuales se obtuvieron mediante un análisis de agrupamiento (*Cluster analysis*) según la distribución promedio mensual de brillo solar de series de estaciones con al menos 10 diez años de datos diarios, la ubicación geográfica y el promedio total de brillo anual en cada estación. Para cada uno de los grupos determinados se obtuvo un patrón mensual con su correspondiente intervalo, con un coeficiente de confianza del 95%. Los resultados de este trabajo pueden ser tenidos en cuenta para estudiar la bondad de algunos métodos de interpolación para estimar datos faltantes de brillo solar.

Chaves (2), a partir de la información de brillo solar obtenida en 32 estaciones meteorológicas de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, aplicó la metodología Box y Jenkins y ajustó modelos ARIMA a series mensuales con la estructura $ARIMA(0,1,1)_s(0,1,1)_{12}$ de promedios móviles con componente estacional de 12 meses. Los pronósticos obtenidos fueron cercanos de los valores observados, actualizados mensualmente, con errores de pronóstico menores del 23%, el cual se considera aceptable. En este trabajo, se mencionan las ventajas de la aplicación de la metodología Box y Jenkins para describir y modelar series de datos de variables climáticas, con el fin de hacer pronósticos a corto plazo.

Se hace evidente en la literatura, los esfuerzos de diferentes autores por resolver el problema de los datos faltantes, pero más enfocados hacia la modelación del fenómeno, partiendo de series históricas completas o a partir de la simulación y generación de series utilizando algoritmos iterativos o técnicas Montecarlo, incluso existe un generador estocástico de datos meteorológicos (10), el cual es un modelo

numérico que genera series diarias sintéticas de variables de clima como precipitación, temperatura y radiación solar. Es éste, los estados para la precipitación (Seco/húmedo) se genera con Cadenas de Markov y la serie de precipitación con función Gamma; para la radiación solar se asume una distribución normal. Para estos trabajos, no se determinan errores de estimación, dado que se generan escenarios de datos diarios.

A partir de lo anterior, y dada la necesidad de tener series históricas completas de brillo solar, se quiso evaluar el “Método de la regresión acumulada” para estimar valores faltantes en las series históricas de brillo solar de estaciones pertenecientes a la red climatológica de la Federación Nacional de Cafeteros-FNC, sin pretender comparar los resultados obtenidos con la bondad de otros métodos que puedan existir para este propósito.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron registros de horas de brillo solar diario, de diez estaciones climáticas de la red meteorológica de la FNC, con más de 25 años de información, operada por la Disciplina de Agroclimatología de Cenicafé (Tabla 1).

Para el análisis se trabajó con las series a partir del año 1974 (34 años), debido al cambio en la metodología de medición para esta variable. Se cuantificó el número de registros faltantes por estación y mes, con el fin de obtener series completas de brillo solar. En cada estación y para cada mes, se establecieron los episodios de El Niño, de La Niña y condición Neutra (grupos), de acuerdo con los Índices Oceánicos de El Niño-ONI, establecidos internacionalmente y publicados en la página del National Weather Service, Climate Prediction Center-NOAA (8). Estos

valores ONI, indican las desviaciones de la temperatura del agua superficial del océano Pacífico ecuatorial, donde temperaturas iguales o mayores a los $0,5^{\circ}\text{C}$ por encima de un valor medio normal (media del año 1971 al 2000) durante 3 meses consecutivos, indica la ocurrencia de El Niño; por el contrario, si la temperatura es de $-0,5^{\circ}\text{C}$ o menos, es un período de La Niña, si no se reúnen estas condiciones se considera un período Neutro (normal).

Para cada estación se seleccionaron de manera aleatoria, 10 meses de cada condición (El Niño, La Niña y Neutro) para validar el método de regresión acumulada, en la estimación de datos faltantes de horas de brillo solar diario.

Con la información restante se hizo lo siguiente:

1. Se tomó como variable de interés o endógena el número de horas de brillo solar acumulado transcurridas desde el inicio hasta el final de cada mes.

2. Para cada estación y grupo se hizo un análisis descriptivo con la variable de interés, y se estimaron los intervalos para el promedio del brillo solar acumulado mensual (histórico), por estación y grupo, con un coeficiente de confianza del 95%.

3. Para cada estación, grupo y mes, a través de una regresión lineal simple, entre el brillo solar acumulado y el tiempo transcurrido en días, se obtuvo la tasa diaria de brillo solar acumulado (Z).

4. En cada estación y en cada grupo, con la información para la validación, se tomó aleatoriamente 1 día o tiempo t (caso 1), 2 días (caso 2), 3 días (caso 3), 4 días (caso 4) hasta completar 10 días (caso 10), en los cuales se asume (en cada caso) como dato faltante. Una vez identificados los días con datos faltantes, se aplicó el método de

la regresión acumulada para su estimación (7), el cual consiste en:

- Identificar el grupo al cual pertenece el mes con el día del dato faltante: El Niño, La Niña, o Neutro.
- Obtener el acumulado de horas de brillo solar (X)
- Si X no es mayor descriptivamente, que el límite superior para el intervalo del acumulado histórico, del mes y grupo, respectivamente, la estimación del dato faltante es Z , de lo contrario será cero.

La validación del método consistió en:

- Obtener el acumulado para el mes, incluyendo la estimación del dato faltante (valor estimado).
- Con el valor real (acumulado incluyendo el dato que fue retirado para asumir el dato faltante), se establece la diferencia absoluta y relativa, del valor estimado con respecto al valor real, los cuales son a su vez, los errores de estimación absoluto y relativo, respectivamente.
- Con el error de estimación relativo y el número de datos faltantes (casos), se evaluó la hipótesis de investigación: “El error relativo promedio de estimación es menor del 13%”, con el estadístico de prueba de t , al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presenta el número de meses y total de días con faltantes de datos de brillo solar, para las estaciones de estudio. Al revisar las series de datos, se encontró que las estaciones Chapetón, Pueblo Bello y Naranjal, en 34 años, presentaron de 546 a 859 días (18–29 meses) sin registro de

Tabla 1. Localización de las estaciones de la red climática de la FNC y número de años con datos registrados de brillo solar.

Estación	Municipio (Departamento)	Latitud Norte		Longitud Oeste		Altitud (m)	Número de años observados	Período de la serie	
		°	'	°	'			Inicio	Final
Bertha	Moniquirá (Boyacá)	05	53	73	34	1.677	34	1953	2007
Chapetón	Ibagué (Tolima)	04	28	75	16	1.353	34	1955	2007
Julio Fernández	Restrepo (Valle)	03	49	76	32	1.381	34	1954	2007
Jorge Villamil	Gigante (Huila)	02	20	75	31	1.420	34	1955	2007
Manuel Mejía	El Tambo (Cauca)	02	24	76	44	1.735	34	1953	2007
Naranjal	Chinchiná (Caldas)	04	58	75	39	1.381	34	1956	2007
Ospina Pérez	Consacá (Nariño)	01	15	77	29	1.603	34	1953	2007
Paraguaicito	Buenavista (Quindío)	04	24	75	44	1.203	34	1963	2007
Pueblo Bello	Valledupar (Cesar)	10	25	73	34	1.134	34	1958	2007
Santa Helena	Marquetalia (Caldas)	05	19	75	00	1.395	27	1981	2007

brillo solar, a diferencia de Paraguaicito y Santa Helena, con 1 y 2 meses sin registro, respectivamente.

Con base en los datos de la Tabla 1, se eliminaron de las series de datos, aquellos meses con al menos un dato faltante de brillo solar, obteniendo series completas. Así, teniendo en cuenta el período de estudio de las series de datos para cada estación (Tabla 1), se ilustra el número de meses o ciclos estudiados en cada grupo, sin contar con los 10 meses seleccionados aleatoriamente de cada condición de El Niño, La Niña y Neutro (Tabla 3), para la validación.

En la Tabla 4, se presentan los valores mínimos, máximos y los percentiles 25, 50 y 75, para la estación Pueblo Bello, en la cual se han registrado como máximo 11,3 horas de brillo solar en al menos un día del mes de febrero del grupo La Niña; del

Tabla 2. Número de meses y total de días con faltantes de datos de brillo solar, por estación.

Estación	Meses	Días
Bertha	7	215
Chapetón	29	859
Julio Fernández	3	91
Jorge Villamil	4	123
Manuel Mejía	7	216
Naranjal	18	546
Ospina Pérez	7	199
Paraguaicito	1	28
Pueblo Bello	27	820
Santa Helena	2	61

total de días analizados, el 75% de éstos, no superan las 9,6 horas de sol al día; además, independientemente del grupo, en el 25% de los días del mes de enero, se registran hasta 7,0 horas de brillo solar diarias, es decir, que en el 75% de los días de este

Tabla 3. Número de meses por estación y grupo, utilizados para la estimación de datos faltantes de brillo solar.

Estación	Grupo		
	El Niño	La Niña	Neutro
Bertha	67	49	111
Chapetón	62	55	131
Julio Fernández	101	74	187
Jorge Villamil	101	75	187
Manuel Mejía	96	75	188
Naranjal	99	57	180
Ospina Pérez	101	75	183
Paraguaicito	101	75	189
Pueblo Bello	84	72	171
Santa Helena	87	57	146

mes, como mínimo se presentan 7,0 horas de brillo solar diario, siendo éste, el único mes, que en todos los grupos, registra en al menos uno de los días como mínimo 0,1 horas de brillo solar.

En general, independiente del grupo analizado, en el 50% de los días de cada mes, para la estación Pueblo Bello, el número de horas de brillo solar que se ha registrado

en un día, alcanza las 8,7 horas, mientras para las demás estaciones analizadas, no se superan las 7,0 horas de brillo solar en un día.

Al analizar el brillo solar acumulado mensual por grupo, en siete de las diez estaciones, el evento La Niña se diferencia por ser el de menor número de horas de brillo solar (Figura 1), de tal manera que las estaciones Chapetón, Julio Fernández, Manuel Mejía, Naranjal, Ospina Pérez y Paraguaicito, presentaron en promedio un brillo solar mensual entre 90 y 129 horas, con errores de estimación entre 4,0 y 6,6 horas para este mismo grupo. La estación Jorge Villamil, recibe en promedio 100 horas de brillo solar, independientemente del grupo (Tabla 5).

Las estaciones Bertha, Pueblo Bello y Santa Helena, presentan en promedio la misma cantidad de horas de brillo solar acumuladas en el mes para los tres grupos (Figura 1). De las estaciones analizadas, Pueblo Bello, es la de mayor número de horas de brillo solar (más de 191 horas), independientemente del grupo.

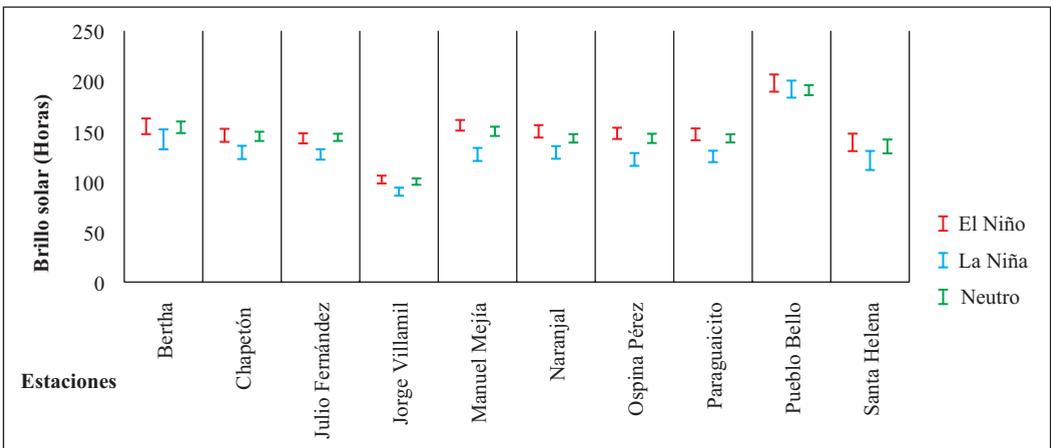


Figura 1. Intervalo, con un coeficiente de confianza del 95%, para el promedio de brillo solar acumulado mensual por evento y por estación.

Tabla 4. Percentiles de horas de brillo solar diario por mes y grupo. Estación Pueblo Bello. 1974- 2007.

Mes	Grupo	Mínimo observado	Percentil			Máximo observado
			25	50	75	
Enero	El Niño	0,5	7,5	8,6	9,5	10,6
Febrero		0,0	7,1	8,7	9,6	10,8
Marzo		0,2	5,5	7,2	8,5	10,1
Abril		0,0	3,9	5,6	6,9	9,3
Mayo		0,0	3,2	5,1	6,6	10,3
Junio		0,0	4,3	6,2	7,7	10,6
Julio		0,0	5,3	7,1	8,3	10,8
Agosto		0,0	5,3	6,6	7,8	10,4
Septiembre		0,0	3,9	6,0	7,0	9,9
Octubre		0,0	4,1	5,6	7,2	10,7
Noviembre		0,0	5,6	7,2	8,7	10,5
Diciembre		0,5	7,4	8,6	9,4	10,5
Enero	La Niña	1,0	7,5	8,6	9,4	10,1
Febrero		0,0	6,2	8,3	9,4	11,3
Marzo		0,0	5,2	6,6	8,4	10,2
Abril		0,1	4,8	6,5	8,1	10,7
Mayo		0,0	4,0	6,0	7,4	10,4
Junio		0,0	3,7	5,9	7,5	10,5
Julio		0,7	4,5	6,5	8,3	10,9
Agosto		0,0	3,7	5,8	7,0	10,5
Septiembre		0,0	4,2	5,8	7,2	10,3
Octubre		0,0	3,3	5,6	6,8	9,2
Noviembre		0,0	4,1	5,7	7,4	10,4
Diciembre		0,2	5,5	7,6	8,6	10,1
Enero	Neutro	0,1	7,2	8,5	9,2	10,5
Febrero		1,6	6,6	8,2	9,4	10,7
Marzo		0,2	5,6	7,3	8,9	10,7
Abril		0,0	3,7	5,7	7,2	10,3
Mayo		0,0	3,3	5,4	7,1	10,6
Junio		0,0	4,0	6,0	7,6	10,7
Julio		0,0	4,8	6,9	8,2	10,9
Agosto		0,0	4,8	6,3	7,7	10,6
Septiembre		0,0	4,1	6,0	7,3	10,5
Octubre		0,0	4,5	5,8	7,2	10,0
Noviembre		0,0	4,7	6,2	7,7	10,1
Diciembre		0,6	6,5	8,1	9,0	10,3

Tabla 5. Promedio y error de estimación para el brillo solar acumulado mensual (horas), en cada estación y grupo.

Estación	El Niño		La Niña		Neutro	
	Promedio	Error de estimación	Promedio	Error de estimación	Promedio	Error de estimación
Bertha	155	7,8	142	9,9	154	5,8
Chapetón	146	6,5	129	6,6	145	4,6
Julio Fernández	143	5,0	127	5,2	144	3,6
Jorge Villamil	102	3,9	90	4,0	100	3,2
Manuel Mejía	156	5,3	127	6,5	150	4,6
Naranjal	150	6,2	129	6,3	143	4,2
Ospina Pérez	148	5,6	122	6,4	143	4,6
Paraguaicito	147	5,9	125	5,7	143	4,1
Pueblo Bello	198	8,6	192	8,5	191	5,0
Santa Helena	139	8,7	121	9,5	135	6,9

Al analizar por grupo y mes, el brillo solar acumulado mensual de cada una de las estaciones, para la estación Chapetón, en el evento El Niño, el número promedio de horas de brillo solar acumulado, fluctuó entre 121 y 170 horas (Figura 2). Para el evento La Niña, descriptivamente, los promedios de brillo solar mensual acumulado están entre 101 y 163 horas (Figura 2b), mientras en el evento Neutro, los promedios de brillo solar acumulado fluctúan entre 117 y 174 horas, presentando los menores errores de estimación con respecto al grupo El Niño y La Niña que van de 3,5 a 12,1 horas (Figura 2c).

En la Tabla 6, se ilustra la estimación de la tasa diaria de brillo solar (Z), para la estación Bertha, para cada mes, en cada evento, cuya interpretación es la siguiente:

Por ejemplo, para la estación Bertha, si se llegara a tener como dato faltante el día 8 del mes de enero clasificado en el evento El Niño, la estimación del número de horas de brillo solar para este día sería de 7,0 mm (Tabla 6), con un error de estimación de 0,10 horas, asumiendo que el acumulado de este mes no supera el límite

superior del promedio histórico. Así, para el mismo grupo en el mes de mayo, siempre y cuando se cumplan las condiciones, la estimación sería 4,0 horas con un error de estimación de 0,09.

Al analizar la tasa diaria para el acumulado de brillo solar mensual (Z) de otras estaciones, tales como Jorge Villamil, se observó que oscila entre 2,4 y 4,4 horas, siendo ésta la estación de menor número de horas de brillo solar; y como caso opuesto, se presenta la estación Pueblo Bello, donde la tasa diaria está entre 5,0 y 8,3 horas de brillo solar. Para las demás estaciones, la tasa diaria es como mínimo 3,4 sin que se superen las 7,0 horas.

Con respecto a la validación del método de la regresión acumulada, en la Tabla 7, se ilustran para cada estación y evento, los errores de estimación absoluto y relativo, independientemente del número de datos faltantes en la serie.

En general, para los grupos de El Niño y Neutro, los errores relativos no superan estadísticamente el 8%, mientras que en el evento La Niña, específicamente en la

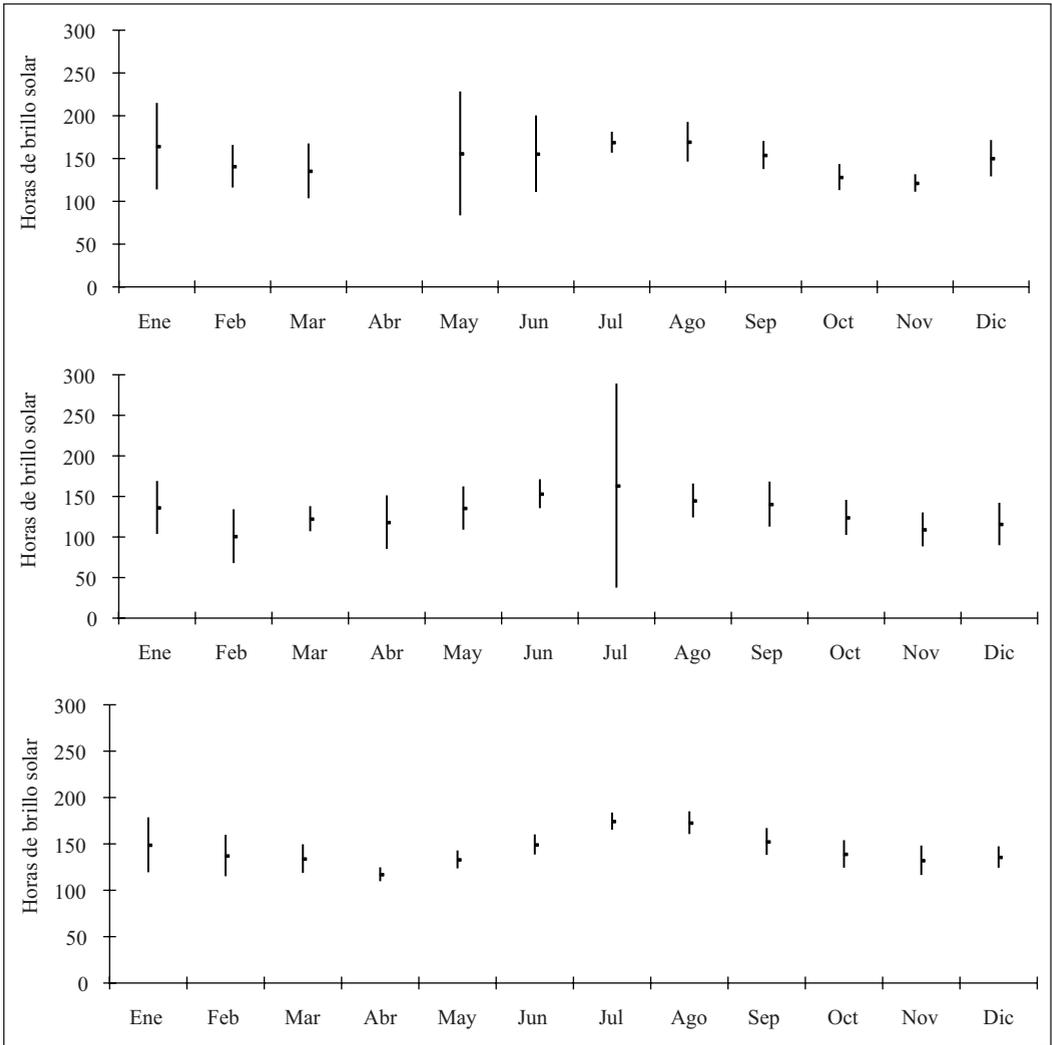


Figura 2. Brillo solar acumulado promedio por mes y su intervalo, con un coeficiente de confianza del 95%. Estación Chapetón. **a.** Evento El Niño; **b.** Evento La Niña; **c.** Evento Neutro.

estación Santa Helena, el error relativo puede ser hasta del 12%.

Al realizar la distribución de los errores relativos para cada caso (número de datos faltantes), por evento, se observó que para el evento El Niño y Neutro, estos errores son inferiores al 8%, según la prueba Z, al 5%, cuando se estiman hasta diez datos faltantes;

mientras que en el evento la Niña, los errores relativos no superan el 10% (Tabla 8).

En la Figura 3, se ilustra el comportamiento de los errores relativos promedio para cada grupo y en general, en función del número de datos faltantes, donde se observa, descriptivamente que a mayor número de datos faltantes mayor error de estimación.

Tabla 6. Tasa diaria para el acumulado de horas de brillo solar mensual, por grupo y mes. Estación Bertha.

Grupo	Mes	Tasa diaria	
		Estimación (Z)	Error de estimación
El Niño	Enero	7,0	0,10
	Febrero	6,0	0,12
	Marzo	5,5	0,14
	Abril	3,9	0,05
	Mayo	4,0	0,09
	Junio	4,5	0,09
	Julio	4,9	0,13
	Agosto	5,2	0,19
	Septiembre	4,5	0,11
	Octubre	4,5	0,13
	Noviembre	5,0	0,11
	Diciembre	5,7	0,11
La Niña	Enero	6,2	0,13
	Febrero	5,0	0,20
	Marzo	4,3	0,25
	Abril	4,2	0,28
	Mayo	4,2	0,11
	Junio	3,6	0,11
	Julio	4,3	0,22
	Agosto	4,3	0,16
	Septiembre	4,0	0,12
	Octubre	4,2	0,12
	Noviembre	4,9	0,19
	Diciembre	4,9	0,20
Neutro	Enero	6,4	0,13
	Febrero	6,9	0,18
	Marzo	4,9	0,12
	Abril	4,2	0,07
	Mayo	4,0	0,08
	Junio	4,5	0,09
	Julio	5,1	0,11
	Agosto	5,0	0,09
	Septiembre	4,7	0,09
	Octubre	4,9	0,09
	Noviembre	5,2	0,07
	Diciembre	5,7	0,11

Tabla 7. Promedio y error estándar de los errores de estimación (EE) absoluto y relativo, para cada estación y evento.

Estación	Grupo	Error absoluto		Error relativo	
		Promedio	EE	Promedio	EE
Bertha	El Niño	6,34	0,591	3,59*	0,302
	La Niña	5,02	0,429	3,71*	0,343
	Neutro	5,61	0,616	4,15*	0,498
Chapetón	El Niño	8,32	0,908	6,46*	0,806
	La Niña	7,08	0,778	6,33*	0,640
	Neutro	7,87	0,656	6,54*	0,590
Julio Fernández	El Niño	8,35	0,618	4,98*	0,349
	La Niña	8,16	0,588	5,84*	0,405
	Neutro	6,22	0,623	4,41*	0,391
Jorge Villamil	El Niño	4,44	0,332	5,02*	0,375
	La Niña	6,61	0,610	6,65*	0,566
	Neutro	6,24	0,518	5,97*	0,444
Manuel Mejía	El Niño	9,47	0,859	4,83*	0,386
	La Niña	7,01	0,850	5,30*	0,555
	Neutro	4,78	0,317	3,63*	0,257
Naranjal	El Niño	4,93	0,379	3,10*	0,241
	La Niña	4,36	0,389	3,33*	0,290
	Neutro	6,01	0,525	4,12*	0,363
Ospina Pérez	El Niño	7,88	0,838	5,19*	0,480
	La Niña	9,48	1,044	6,55*	0,593
	Neutro	5,50	0,442	3,69*	0,310
Paraguaicito	El Niño	5,52	0,430	3,81*	0,350
	La Niña	5,57	0,483	4,07*	0,338
	Neutro	8,57	0,917	5,56*	0,499
Pueblo Bello	El Niño	5,46	0,481	2,75*	0,244
	La Niña	7,31	0,713	3,70*	0,342
	Neutro	6,28	0,752	3,14*	0,360
Santa Helena	El Niño	9,28	0,679	6,86*	0,451
	La Niña	9,49	0,793	9,91*	1,103
	Neutro	6,99	0,795	4,79*	0,515

* Promedios menores estadísticamente al 13%, según prueba t al 5%.

Cuando las estimaciones se hacen, hasta seis datos faltantes de un mes del grupo El Niño o Neutro, los errores relativos promedio no superan el 6%; mientras que este mismo error se logra cuando se estiman hasta cuatro datos faltantes cuando el mes pertenece al grupo La Niña; sin embargo, es de anotar que estadísticamente, los errores relativos promedio

no superan el 10%, independientemente del grupo y el número de datos faltantes (Figura 2), con lo cual fue corroborada la hipótesis de investigación: “El error relativo promedio de estimación es menor del 13%”.

Puede concluirse que el método de la regresión acumulada, para estimar datos

Tabla 8. Promedio y error estándar para errores de estimación (EE) absolutos y relativos según el número de datos faltantes por evento.

Grupo	Número de datos faltantes	Error absoluto		Error relativo	
		Promedio	EE	Promedio	EE
El Niño	1	2,86*	0,229	1,89**	0,139
	2	4,41*	0,367	2,94**	0,235
	3	5,67*	0,512	3,66**	0,293
	4	5,90*	0,616	3,72**	0,337
	5	7,35*	0,674	4,93**	0,432
	6	7,67*	0,675	5,00**	0,431
	7	8,26*	0,747	5,68**	0,523
	8	8,49*	0,683	5,80**	0,473
	9	9,82*	0,805	6,63**	0,601
La Niña	10	9,57*	0,755	6,37**	0,518
	1	2,48*	0,192	1,96**	0,142
	2	3,73*	0,360	2,90**	0,264
	3	5,10*	0,482	3,88**	0,357
	4	6,14*	0,556	4,87**	0,462
	5	6,81*	0,651	5,24**	0,458
	6	7,82*	0,702	6,20**	0,585
	7	8,97*	0,784	7,04**	0,589
	8	9,41*	0,829	7,45**	0,668
	9	9,32*	0,890	7,53**	0,819
Neutro	10	10,28*	0,876	8,31**	0,838
	1	2,57*	0,177	1,86**	0,128
	2	3,93*	0,340	2,73**	0,212
	3	5,10*	0,440	3,63**	0,276
	4	5,49*	0,552	3,87**	0,340
	5	6,51*	0,600	4,69**	0,392
	6	7,22*	0,627	5,13**	0,434
	7	7,63*	0,726	5,55**	0,510
	8	8,15*	0,787	5,92**	0,554
	9	8,58*	0,807	6,17**	0,575
10	8,91*	0,772	6,45**	0,536	

* Promedios menores estadísticamente a 12 horas, según prueba t al 5%.

** Promedios menores estadísticamente al 10%, según prueba t al 5%.

faltantes de horas de brillo solar, es flexible dado que se ajusta a las características propias de cada estación y grupo y su estimación depende única y exclusivamente de su historia, por lo tanto puede ser difundido como una técnica viable para la estimación

de ellos, con un error relativo promedio, estadísticamente inferior al 10%, cuando se estiman hasta diez datos faltantes para un mismo mes, independientemente del grupo y un error relativo promedio, estadísticamente inferior al 6%, cuando se estiman hasta

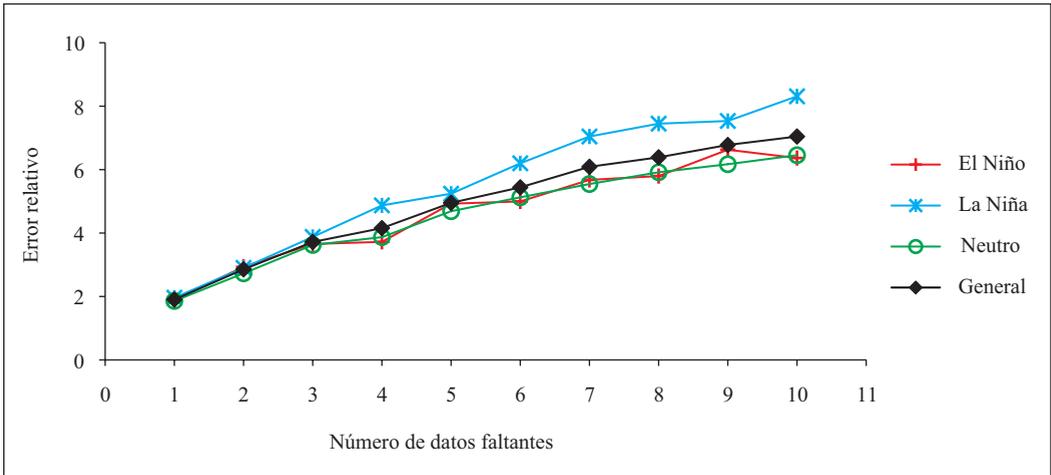


Figura 3. Error relativo promedio de acuerdo con el número de datos faltantes, por evento y en general.

seis datos faltantes para un mismo mes del grupo El Niño o Neutro. Para lograr estos errores de estimación, se requiere de series de brillo solar diaria superiores a 25 años.

LITERATURA CITADA

- CAÑIZARES, M.; BARROSO, I.; ALFONSO, K. Datos incompletos: Una mirada crítica para su manejo en estudios sanitarios. [En línea]. *Gaceta sanitaria* 18(1):58-63. 2004. Disponible en internet: <http://www.scielo.isciii.es/pdf/gsv18n1/metodologica.pdf>. Consultado el 4 de Abril de 2009.
- CHAVES C., B. Stochastic modeling of monthly sun bright in coffee growing areas. *Revista colombiana de estadística* 25(1):59-71. 2002.
- CHAVES C., B.; JARAMILLO R., A. Regionalización de la distribución de brillo solar en Colombia por métodos de conglomeración estadística. *Cenicafé* 48(2):120-132. 1997.
- FLORES, B.M.; LAGOS, I.J.; FLORES, J.M. Estudio preliminar de la Heliofanía en Honduras. [en línea]. Disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia25.pdf>. Consultado el 3 de Septiembre de 2008.
- GUZMÁN M., O.; GÓMEZ G., L. Caracterización del brillo solar en Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 48(1):26-39. 1997.
- JARAMILLO R., A. *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 192 p.
- MEDINA R., R.; MONTOYA R., E.C.; JARAMILLO R., A. Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia datos faltantes. *Cenicafé* 59(3):260-272. 2008.
- NATIONAL WEATHER SERVICE. Climate prediction center. [En línea]. Disponible en Internet: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml. Consultado en Marzo de 2010.
- RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A.; PEÑA Q., A.; VALENCIA, A.J. El brillo solar en la zona cafetera colombiana, durante los eventos El Niño y La Niña. Chinchiná : CENICAFÉ, 2012. 11 p. (Avances Técnicos No. 421).
- SEMENOV, M.; BARROW, E.M.; RICHARDSON, C.W. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.rothamsted.ac.uk/mas-models/SupportFiles/Papers/ComparisonWGENandLARSWG.pdf>. Consultado el 5 de Noviembre de 2008.

EVALUACIÓN DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS Y CALIDAD DE AGUA EN QUEBRADAS DE FINCAS CAFETERAS DE CUNDINAMARCA Y SANTANDER, COLOMBIA

Luz Ángela Galindo-Leva*; Luis Miguel Constantino-Chuaire*; Pablo Benavides-Machado*; Esther Cecilia Montoya-Restrepo**; Nelson Rodríguez -Valencia***

RESUMEN

GALINDO L., L.A.; CONSTANTINO C., L.M.; BENAVIDES M., P.; MONTOYAR., E.C., RODRÍGUEZ V.; N. Evaluación de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua en quebradas de fincas cafeteras de Cundinamarca y Santander, Colombia. Revista Cenicafé 63(1): 70-92. 2012

Se estudiaron las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en 54 fincas cafeteras de Santander y Cundinamarca, comparando dos sistemas agroforestales de *Coffea arabica* (con certificación *Rainforest Alliance* -C y sin certificación-NC) en bloques pares, seleccionados completamente al azar, para analizar los cambios de abundancia, composición y estructura asociados con la contaminación de fuentes de agua. En los nacimientos de agua de cada finca, en época de cosecha y fuera de cosecha, en dos puntos del cuerpo de agua (origen y final), se realizaron análisis fisicoquímicos y recolecciones de macroinvertebrados. En total, se recolectaron 11.275 ejemplares para los dos departamentos, distribuidos en 35 órdenes, 114 familias y 352 morfoespecies. Como resultado se encontraron diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas en la calidad del entorno físico de los ecosistemas, evaluada con los protocolos SVAP y CIPAV, en los dos departamentos. El índice biótico BMWP indicó diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas para los dos departamentos con valores promedio de $118,4 \pm 7,94$ en fincas CE y $71,73 \pm 7,6$ en fincas NC de Cundinamarca. Para Santander los valores BMWP fueron de $65 \pm 7,14$ en fincas CE y $48,8 \pm 6,18$ en fincas NC. Las variables fisicoquímicas como la carga de contaminación orgánica DBO y la demanda química de oxígeno DQO mostraron diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas. Se concluye que con la adopción de la Norma de Agricultura Sostenible se generan mejores condiciones físicas y mejor calidad del agua para sustentar poblaciones más diversas de macroinvertebrados acuáticos.

Palabras clave: Certificación ambiental, insectos acuáticos, análisis fisicoquímicos, índices bióticos, *Coffea arabica*.

ABSTRACT

The aquatic macro-invertebrate communities of 54 coffee farms in Cundinamarca and Santander were studied by comparing two agroforestry systems of *Coffea arabica* (with *Rainforest Alliance*-C and without certification-NC) in paired blocks with a completely randomized design in order to analyze the changes in abundance, composition and structure associated with water sources contamination. Physicochemical analyses and macro-invertebrate collections were carried out in the water springs of each farm during harvest and during non-harvest time in two points of the water body (start and end). In total, 11,275 samples were collected in both departments, distributed into 35 orders, 114 families and 352 morpho-species. There were significant differences in favor of the Certified farms with respect to the quality of the physical environment of ecosystems, evaluated with SVAP and CIPAV protocols in both departments. The BMWP biotic index indicated significant differences in favor of the Certified farms for both departments with average values of 118.4 ± 7.94 in C farms and 71.73 ± 7.6 in NC farms of Cundinamarca. For Santander, the BMWP values were 65 ± 7.14 and 48.8 ± 6.18 in NC farms. The physicochemical variables such as organic pollution load BOD and chemical demand of COD oxygen showed significant differences in favor of Certified farms. The conclusion is that with a Sustainable Agriculture adoption, there are better physical conditions and better water quality to support a more diverse population of aquatic macro-invertebrates.

Keywords: Environmental Certification, aquatic insects, physicochemical analyses, biotic indices.

* Investigador Asociado, Investigadores Científicos II, respectivamente. Disciplina de Entomología. Cenicafé.

** Investigador Científico III, Disciplina de Biometría, Cenicafé.

*** Investigador Científico I, Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El agua, al igual que el suelo, son los componentes que más sufren por problemas de contaminación, debido a que constituyen el factor más importante en la determinación del tipo, complejidad y productividad de los ecosistemas. Los sistemas agrícolas dependientes de altos insumos de origen químico, los cuales ayudan a aumentar la productividad, con el paso del tiempo traen una serie de problemas de contaminación persistentes, tanto en los suelos, como en los alimentos y las aguas (5). Este problema se ve reflejado tanto desde el inicio del ciclo productivo, con el uso de los insumos agrícolas, como al final, con la producción de desechos y contaminantes. Los problemas se dan desde el abastecimiento de insumos para la producción agrícola (fertilizantes, plaguicidas, herbicidas), continúa en la actividad primaria (uso del suelo y agua, erosión del suelo, pérdida de biodiversidad) de la producción, se prolonga hasta la actividad secundaria de beneficio y procesamiento, hasta la comercialización (14).

Por ejemplo, los fertilizantes químicos y pesticidas aplicados al suelo y la vegetación en los cultivos son una fuente importante de contaminación antropogénica para los suelos y aguas, superficiales y subterráneas, ya que muchos de ellos por efectos de la adsorción por el suelo y la lixiviación se filtran a las aguas subterráneas y nacimientos de agua; igualmente, las lluvias lavan las partículas de los químicos suspendidos en la vegetación y el suelo y por efectos de escorrentía llegan a las fuentes de agua. Los principales contaminantes producidos por los fertilizantes son los iones nitratos, derivados del nitrato de sodio.

El agua para consumo humano o animal debe ser química y biológicamente pura. Esta pureza misma hace que sobre ella no se desarrollen microorganismos y vegetales.

Cuando ésta se enriquece con calcio, magnesio, sodio y principalmente de fósforo se dice que el agua se ha eutroficado, comenzando el desarrollo de todo tipo de organismos, con exceso de algas y plantas acuáticas, las cuales la vician tomando el oxígeno (aumentando la demanda bioquímica de oxígeno DBO), aportando materia orgánica que para su descomposición requiere de oxígeno (DQO), y aumentando el contenido de dióxido de carbono y a su vez la acidez. El resultado final de esta alteración es la falta de oxígeno para peces y macro invertebrados y la impotabilidad para su consumo por el hombre (12,14).

Para el caso del beneficio del café, se conoce que los desechos de aguas mieles y de arrastre de pulpa como las percoladas a través de fosas con pulpa en descomposición y las de lavado de café fermentado, son aguas muy tóxicas para los animales como los peces y renacuajos, diluidas al 50% matan a todos los animales en unos minutos o en algunas horas, y diluidas al 1% afectan la supervivencia de los animales hasta por 5 días (6, 7, 23).

Una forma de valorar los bienes y servicios ambientales que los sistemas productivos pueden generar e igualmente para estimar la salubridad de los ecosistemas acuáticos, es a través de la evaluación de indicadores biológicos, que permitan cuantificar los cambios de abundancia y diversidad en un sitio dado. Los parámetros biológicos empleados en este estudio son los llamados indicadores ecológicos de calidad de agua, los cuales se hallan constituidos por un grupo de pequeños macroinvertebrados bentónicos como larvas y ninfas de insectos de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Coleoptera y Diptera, entre otros taxa, crustáceos, platelmintos, anélidos hirudíneos y oligoquetos, y moluscos gasterópodos que

responden de diferente manera o en diferentes escalas a la presión externa generada por las prácticas agrícolas o a los beneficios de las actividades que mitigan el deterioro de los ecosistemas (3, 26, 27).

En la evaluación de indicadores ecológicos de calidad de agua, el índice BMWP (*Biological Monitoring Working Party Score System*) es muy útil y de uso frecuente en evaluaciones ambientales. En varias regiones del país como Antioquia, Cauca, la sabana de Bogotá y Norte de Santander, entre otras, hay adaptaciones a condiciones locales con base en la fauna de macroinvertebrados que tipifican la zona (15, 18, 21, 29, 30, 32). Este índice evalúa la presencia de diferentes familias de macroinvertebrados y asigna rangos de calidad en ambientes lóticos, de acuerdo con la composición de las comunidades presentes debido a que dicha composición de la comunidad de bentónicos puede aportar información valiosa dada su sensibilidad a las modificaciones del hábitat (2, 3, 4, 16, 17, 24). Para el presente estudio se utilizó la adaptación del índice BMWP de Zúñiga y Cardona (37), diseñada para cuerpos de agua de primer orden (aljibes o nacimientos) de la zona andina de Colombia.

Algunos índices basados en la riqueza (número de especies) han tenido, aunque breve, una importante trayectoria en los estudios de bioindicación; han sido probados y validados previamente para Suramérica y se ha encontrado un alto grado de precisión para la evaluación de la calidad del agua (13). Por ejemplo, el índice biótico EPT y ELPT (número de especies de Ephemeroptera / Elmidae, Plecoptera y Trichoptera) son medidas eficientes para evaluar la calidad biológica mediante un valor que mide los grupos clave (menos tolerantes) que responden de forma clara a la perturbación. En este sentido, la diversidad alfa de la comunidad es

otra variable que se usa como una medida de la calidad ambiental en un cuerpo de agua.

Los sellos certificadores al cultivo de café que acogen la Norma de Agricultura Sostenible (NAS) afirman que su adopción promueve la conservación de la biodiversidad. Para corroborar el papel de las fincas cafeteras en este proceso, se muestrearon macroinvertebrados acuáticos comparando dos sistemas agroforestales de *Coffea arabica* (con certificación *Rainforest Alliance* y sin certificación) en bloques pares seleccionados completamente al azar, con el objeto de analizar los cambios de abundancia y composición asociados con la contaminación de fuentes de agua, y poder estimar la salubridad de los ecosistemas acuáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló en los departamentos de Cundinamarca y Santander. Para Cundinamarca, las fincas muestreadas con nacimientos de agua abarcaron los municipios de San Francisco, Supatá, Vergara, La Palma y Guaduas, dentro de la cuenca del río Negro al Noroccidente del departamento, en un rango altitudinal comprendido entre 1.410 y 1.820 m. Esta zona se caracteriza por presentar un relieve fuertemente ondulado y en algunos casos quebrados con pendientes y escarpes fuertes. En el aprovechamiento hídrico de la cuenca se beneficia el sector agrícola y pecuario y el abastecimiento de acueductos urbanos y rurales. La cuenca registra precipitaciones medias anuales entre 1.670 mm y 2.500 mm en la parte alta.

Las fincas muestreadas en el departamento de Santander con nacimientos de agua estuvieron ubicadas en los municipios de Aratoca, Valle de San José, Pinchote, Socorro, Barbosa, Guavatá y Vélez, en un rango altitudinal comprendido entre los 1.420 y

1.906 m. Los cuatro primeros municipios se clasifican dentro del ecotopo cafetero 305A, el cual se localiza abarcando la cuenca del río Chicamocha y río Sogamoso, y las subcuencas de los ríos Fonce y Suárez. Las precipitaciones anuales van de 1.500 a 2.000 mm, disminuyendo de diciembre a febrero y de junio a agosto, con déficit hídrico en el suelo para los meses de diciembre, enero y febrero.

Selección de la muestra. En cada departamento (Cundinamarca y Santander), se seleccionaron de manera aleatoria 54 fincas cafeteras (27 fincas Certificadas que habían implementado la Norma de Agricultura Sostenible (NAS) y 27 fincas sin certificar sin ningún tipo de sello; debidamente registradas en el Sistema de Información Cafetera-SIC@, de los Comités Departamentales de Cafeteros correspondientes, y con 3 años o más de certificación *Rainforest Alliance* (RA). El marco de muestreo estuvo conformado por aquellas fincas que cumplieron este criterio y que estuvieran presentes en aquellos municipios que abarcaran como mínimo el 80% de las fincas Certificadas RA, según la prueba de Pareto (10).

Por cada finca seleccionada con certificación RA (CE) (bloque par), se tomó una finca No Certificada (NC), sin algún tipo de sello, contigua y con condiciones similares en topografía, microclima, altitud y cultivo de café. Igualmente, que tuviesen un cuerpo de agua (nacimiento) al interior de la finca con flujo continuo, no interrumpido, desde el origen hasta el final.

Análisis fisicoquímicos. Tanto en las fincas Certificadas como No Certificadas se realizaron en dos tiempos de muestreo (época de cosecha principal y fuera de ésta, en adelante llamadas cosecha y no cosecha) y en dos puntos del cuerpo de agua, en el origen del nacimiento

de agua dentro de la finca y al final de la quebrada, en el lindero de la finca, el registro de las variables *in situ* (Alcalinidad con el uso del kit HI 3811, marca Hanna Instruments, para neutralizar ácidos con un pH superior a 4,5 por titulación; dureza empleando el kit HI 3812 marca Hanna Instruments, para determinación de dureza residual en aguas blandas con el método complexométrico; pH mediante microcomputador medidor de pH T19000 marca WalkLab Trans Instruments; temperatura evaluada por medio de un termómetro digital T19000 marca WalkLab Trans Instruments; oxígeno disuelto medido con Oxímetro digital marca WalkLab Trans Instruments; y sólidos suspendidos empleando un medidor de sólidos en suspensión marca WalkLab Trans Instruments).

En el mismo punto de muestreo se recolectaron muestras de agua de 600 ml para el laboratorio de Biodigestión de la Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación de Cenicafé, para realizar los análisis fisicoquímicos *ex situ* (DBO, DQO, color verdadero, sólidos totales y suspendidos) siguiendo los procedimientos de métodos estándar normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (1). Las muestras recolectadas fueron acidificadas en el campo hasta un pH inferior a dos ($\text{pH} < 2$) y transportadas a 8°C hasta el laboratorio, en neveras refrigeradas de icopor. Para los análisis DBO se utilizó el método Winkler en alícuotas de 200 ml de muestra, para el DQO el método de digestión-Semimicro-Espectrofotométrico en 2 ml de muestra a un pH entre 5,5 y 6,5 en viales DQO, para el color verdadero con el método estándar de Platino-Cobalto (Un Pt/Co), y Sólidos totales con el método gravimétrico.

Recolección de macroinvertebrados. En estos mismos puntos de muestreo de los análisis fisicoquímicos de aguas (origen y

final) se recolectaron macroinvertebrados empleando redes acuáticas con poros de 300 μ (Red D y cónica *minor*) y moviendo el sustrato para causar el desprendimiento de los individuos. Adicionalmente, se realizaron jameos acuáticos rozando los bordes, piedras y vegetación sumergida, y superficie del agua en pocetas, con el fin de abarcar todos los micro-hábitats presentes en los cuerpos de agua. De manera complementaria se recolectaron muestras de 300 g de detritos y hojarasca, para la separación en el laboratorio de especímenes adheridos. En los casos en que no fue posible acceder a los dos puntos de muestreo se recolectaron 600 g de detritos del mismo lugar, para obtener un tamaño de muestra equitativo en todos los cuerpos de agua. Igualmente, se realizaron recolecciones cualitativas removiendo piedras y vegetación sumergida durante 1 hora con un mismo esfuerzo de muestreo representado en 2 horas/hombre/día y capturando con pinzas los ejemplares perceptibles a simple vista, de tal manera que los datos estadísticos de riqueza y abundancia para cada localidad pudieran ser comparables entre sí.

La totalidad de ejemplares obtenidos tanto de las recolecciones cuantitativas (con redes de arrastre y remoción de detritos) como cualitativas (de manera manual con pinzas) fueron identificados a nivel de familia y clasificados como morfoespecies, con esta información se obtuvieron las siguientes variables de interés:

El índice biótico BMWP (Biological Monitoring Working Party Score System) (2), asigna a cada familia de macroinvertebrados acuáticos un puntaje que varía entre uno y diez, de acuerdo con su tolerancia a la contaminación. Para el presente análisis se utilizó el índice BMWP/Univalle 2009, el cual fue adaptado para Colombia, específicamente

para cuerpos de agua pequeños (de primer a tercer orden) de ambientes andinos (36, 37) y es un índice independiente de la estacionalidad. Los valores de este índice se obtienen mediante la suma de los puntajes de todas las familias encontradas en un cuerpo de agua. Dichos puntajes se asignan de acuerdo a la tabla de tolerancia (Tabla 1) de tal manera que el mayor puntaje (diez) lo obtienen las familias menos tolerantes a la contaminación y los menores puntajes se asignan a aquellas familias muy tolerantes, que se pueden encontrar en gran variedad de condiciones y pueden soportar bajos niveles de oxígeno disuelto, pH y temperatura, entre otros. Los rangos para clasificar la calidad del agua van desde muy limpias hasta contaminadas, en un rango en un puntaje que varía entre 120 y 1 (Tabla 2).

Índices bióticos EPT y ELPT, los cuales se obtienen de manera muy similar al índice BMWP. Son el resultado de la sumatoria de la cantidad de especies o morfoespecies que corresponden a los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en el caso de EPT o Coleoptera, Elmidae, Plecoptera y Trichoptera en el caso de ELPT, quienes son considerados los grupos menos tolerantes a la contaminación; es decir, para este último, las especies del orden Ephemeroptera se cambian por especies de la familia Elmidae del orden Coleoptera (20).

Los valores que se obtienen para este índice se confrontan con una tabla de categorías de calidad del agua (Tabla 3) de la misma manera que con el BMWP. Estos índices se calcularon de manera complementaria con el objetivo de dar soporte o ratificar los resultados.

Índice físico SVAP (*Stream Visual Assessment Protocol*). Protocolo de valoración visual de quebradas y CIPAV. El protocolo SVAP (8, 25)

Tabla 1. Tolerancia a la contaminación de aguas con las puntuaciones asignadas a las familias de macroinvertebrados bentónicos, para la obtención del índice BMWP (37) para quebradas andinas de Colombia.

Orden: Familias	Puntuación
Plecoptera: Perlidae; Ephemeroptera: Oligoneuriidae; Trichoptera: Calamoceratidae; Coleoptera: Psephenidae; Diptera: Blepharoceridae; Odonata: Polythoridae	10
Ephemeroptera: Euthyplociidae; Trichoptera, Helicopsychidae, Odontoceridae, Philopotamidae, Anomalopsychidae; Coleoptera: Ptilodactylidae; Megaloptera, Corydalidae	9
Ephemeroptera: Leptophlebiidae, Polymitarciidae, Caenidae; Trichoptera: Leptoceridae, Hidrobiosidae, Xiphocentronidae, Hydroptilidae; Odonata: Gomphidae	8
Ephemeroptera: Leptohiphidae; Trichoptera, Glossosomatidae, Polycentropodidae; Coleoptera: Elmidae; Odonata: Aeshnidae, Calopterygidae	7
Coleoptera: Elmidae, Scyrtidae; Odonata: Coenagrionidae; Diptera: Simuliidae; Hemiptera: Corixidae, Gerridae, Veliidae; Gasteropoda: Ancylidae	6
Ephemeroptera: Baetidae; Trichoptera: Hydropsychidae; Coleoptera: Staphylinidae; Odonata, Libellulidae; Hemiptera: Naucoridae; Diptera: Tipulidae, Muscidae	5
Coleoptera: Curculionidae, Crysomelidae, Hydrophilidae, Gyrinidae; Diptera: Tabanidae, Ceratopogonidae, Psychodidae, Dixidae, Empididae; Hemiptera: Belostomatidae; Lepidoptera: Pyralidae, Tricladida, Planariidae; Gasteropoda: Planorbidae, Lymneidae, Thiaridae	4
Coleoptera: Dytiscidae; Hemiptera: Hydrometridae; Gastropoda: Physidae, Bivalvia, Sphaeriidae, Hirudinea, Glossiphonidae	3
Diptera: Chironomidae, Culicidae, Syrphidae	2
Oligochaeta: Tubificidae	1

Tabla 2. Rangos de clasificación del índice biótico BMWP según Zúñiga y Cardona (37).

Categoría	Rango
Aguas muy limpias	> 120
Aguas no alteradas de modo sensible	101-120
Aguas con evidencia de algunos efectos de contaminación	61-100
Aguas contaminadas	36-60
Aguas muy contaminadas	16-35
Aguas fuertemente contaminadas	<15

evalúa el hábitat físico de un río o quebrada mediante la asignación de puntajes entre uno y diez (Tabla 4). Para esta evaluación se usan más de 15 parámetros que en ciertos casos pueden excluir uno o más de éstos, cuando no se aplica a un sitio. El proceso consiste en calificar estos 15 parámetros aplicando altos puntajes (9,0 a 10) para ríos

o quebradas que tienen condiciones sanas, y bajos puntajes (2,2 a 1) para ríos o quebradas en mal estado. El protocolo CIPAV (11) por su parte, es una evaluación muy similar al que propone el SVAP, tiene en cuenta criterios muy similares y fue diseñado por el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria, para la evaluación de corrientes de agua de bajo gradiente en las zonas Andinas de Colombia (11). Ambos protocolos SVAP y CIPAV usan los mismos criterios y puntajes.

Índice de similitud de Bray Curtis. Para combinar la información proporcionada por el método de ordenación, se realizó un dendrograma (aglomeración por ligamiento promedio bajo el algoritmo de UPGMA) a partir de la matriz de similitud mediante el Índice de Bray-Curtis (22), de acuerdo

Tabla 3. Rangos de clasificación para los índices bióticos EPT y ELPT (20).

Categoría	Rango
Sin impacto	> 10
Levemente impactado	6-10
Moderadamente impactado	2-5
Severamente impactado	0-1

Tabla 4. Rangos de clasificación de los índices físicos de valoración visual SVAP/CIPAV (11).

Categoría	Rango
Óptimo	9,0-10
Subóptimo	7,5- 8,9
Aceptable	6,1-7,4
Pobre	6,0-2,3
Deficiente	1,0-2,2

a la siguiente fórmula: $D_{1,2} = \sum qi$, donde $D_{1,2}$ es la similaridad entre las muestras 1 y 2 y qi es la menor de las abundancias relativas de la especie i . D puede variar de 0 a 1, indicando valores $> 0,6$ de muestras replicadas. La disimilaridad de Bray-Curtis entre tramos es 1 menos la Similaridad de Bray-Curtis entre los tramos. Cada taxón que no es idéntico en las dos muestras contribuye a una parte de la disimilaridad entre lugares.

Análisis de datos. Con las variables de interés, cuya naturaleza es cuantitativa, se estimaron los intervalos de confianza, con un coeficiente de confianza del 95% y a través del estadístico de prueba t , se definieron, con cada una de las variables de interés, las diferencias entre las fincas Certificadas y No Certificadas, utilizando el paquete estadístico SAS v. 9.3. Para respaldar los resultados se realizó una matriz de correlaciones con el coeficiente de Pearson (P de r) para cuantificar la influencia de cada variable sobre las demás.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diversidad y abundancia de macroinvertebrados acuáticos. En total se recolectaron 11.244 ejemplares de macroinvertebrados acuáticos durante los dos muestreos (cosecha y no cosecha de café) para los dos departamentos (Tabla 5), distribuidos en 35 órdenes, 114 familias y 352 morfoespecies o posibles especies. Algunos de éstos se ilustran en la Figura 1. Dentro de este grupo de especímenes recolectados, cerca del 14% corresponden a organismos semiacuáticos o asociados a la vegetación ribereña. Es válido mencionar que la mayor proporción (abundancia) de organismos se recolectó en los puntos de muestreo de “origen” en el departamento de Santander y de manera contraria ocurrió en Cundinamarca. Este resultado está relacionado con las características físicas del entorno, debido a la significativa atención que los propietarios ponen en estos puntos, puesto a que es justo del origen de donde obtienen el abastecimiento para las labores de la finca, esto quiere decir que para los propietarios éste es el punto de interés y en donde enfocan el cuidado de su ecosistema acuático, lo cual se ve reflejado en mejores valores de SVAP en esos puntos de muestreo.

Se observó en la mayoría de las fincas CE y NC que la cobertura de dosel, el manejo del borde ripario y el cuidado general del entorno decrece en la medida en que se aleja del punto de origen, de tal manera que el cauce restante carece de interés en algunas fincas.

Debido a este comportamiento, en el 35% de los cuerpos de agua de las fincas No Certificadas y el 33% de las fincas Certificadas en Santander, está ausente la escorrentía o cauce, existen transformaciones severas de ambientes lóticos a lénticos, por la conversión

Tabla 5. Cantidad de macroinvertebrados acuáticos recolectados en cada departamento para cada muestreo, durante época de cosecha y no cosecha de café.

Departamento	Cundinamarca									
	Cosecha				No Cosecha				Total	
Época de muestreo	Final		Origen		Final		Origen			
Punto de muestreo	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza
Fincas Certificadas	1.038	122	888	87	1.296	132	707	143	3.934	121
Fincas No Certificadas	783	86	540	82	1.169	65	551	99	3.043	83
Total general	1.821	208	1.428	169	2.465	197	1.258	242	6.977	204

Departamento	Santander									
	Cosecha				No Cosecha				Total	
Época de muestreo	Final		Origen		Final		Origen			
Punto de muestreo	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza	Abund.	Riqueza
Fincas Certificadas	518	100	967	119	403	60	648	65	2.536	86
Fincas No Certificadas	359	73	624	66	225	45	529	57	1.731	62
Total general	877	173	1.591	185	628	105	1.177	122	4.267	148

Gran Total									11.244	352
-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	---------------	------------



Figura 1. Algunos macroinvertebrados recolectados. **a.** Coleoptera: Hydrophilidae, larva. **b.** Plecoptera: Perlidae, ninfa. **c.** Ephemeroptera: Baetidae, ninfa. **d.** Ephemeroptera: Leptohyphidae, ninfa. **e.** Coleoptera: Elmidae, larva. **f.** Trichoptera: Philopotamidae, larva. **g.** Diptera: Simuliidae, larva. **h.** Coleoptera: Dityscidae, adulto. **i.** Coleoptera: Gyrinidae.

de los cuerpos de agua en pocetas, y por este motivo carecen de punto de muestreo “final”, lo que se refleja en un número menor de capturas de macroinvertebrados para estos puntos de muestreo. Para los análisis estadísticos se omitieron los cuerpos de agua en los que la recolección se limitó al punto de muestreo “origen” en el departamento de Santander.

Aunque ésta es una práctica generalizada en los dos departamentos donde se realizó el estudio y pese a que en Cundinamarca las condiciones físicas del entorno en algunos cuerpos de agua no alcanzan valores óptimos, las transformaciones de los cuerpos de agua no implican la eliminación del cauce, permitiendo la escorrentía y oxigenación del agua en su recorrido, lo que favorece el mantenimiento de los organismos que los habitan.

Consecutivamente, se recolectó un mayor número de ejemplares en Cundinamarca para la época de no cosecha y en Santander para la época de cosecha. Es necesario resaltar que los muestreos coincidieron con épocas de características climáticas diferentes, de tal manera que los muestreos de Cundinamarca se llevaron a cabo en época de ocurrencia del Fenómeno de La Niña y en la etapa de normalización de las lluvias. En contraste, los muestreos de Santander se realizaron en épocas más secas y con déficit hídrico según lo documentado por los datos de precipitación promedio mensual, sin embargo los cambios drásticos en los regímenes climáticos no deben afectar de forma severa los patrones normales y la dinámica de estos cuerpos de agua si un buen entorno físico está presente para amortiguarlos (9).

La considerable disminución en las precipitaciones durante los muestreos en Santander se reflejó de manera importante en la disminución de los caudales y en la

captura de especímenes. Sin embargo, los índices de calidad del agua fueron evaluados y calibrados a partir de tres cuerpos de agua considerados puntos de referencia por ser, de acuerdo a las valoraciones visuales, los menos impactados y de corrientes naturales. En estos puntos de referencia se encontraron aproximadamente el 90% de las familias contempladas por el BMWP, incluyendo categorías de la seis a la diez (menos tolerantes a la contaminación).

Análisis fisicoquímicos e índices bióticos de calidad del agua. En total se consideraron 24 variables para las evaluaciones realizadas. A continuación se relacionan las más relevantes para los resultados. Los valores correspondientes a cada finca para la totalidad de variables se relacionaron de manera individual. La realización del estadístico de prueba *t* - Student arrojó diferencias significativas entre los dos grupos de datos (fincas Certificadas - CE y No Certificadas - NC) para los dos departamentos, en algunas variables que determinan la calidad del agua y del entorno físico (Tabla 6).

Cundinamarca fue el departamento que presentó mayor cantidad de variables cuyos resultados en cuanto a la construcción de los intervalos de confianza y el estadístico de prueba *t*, indicaron diferencias significativas entre las fincas Certificadas y No Certificadas. De este modo, sobresalen las variables BMWP, EPT y ELPT, que determinan la calidad del agua con base en la tolerancia de la comunidad de macroinvertebrados a la contaminación. No obstante, para Santander, de las variables mencionadas, se encontraron diferencias en los promedios para las fincas Certificadas con respecto a sus pares No Certificadas en BMWP, para el muestreo de no cosecha. Se destaca que los valores obtenidos para estas variables fueron más altos en Cundinamarca que en Santander (Figura 2).

Tabla 6. Valores promedio y error estándar (E.E.), para algunas de las variables de interés en fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca y Santander.

Variable	Cundinamarca				Santander			
	Certificadas		No Certificadas		Certificadas		No Certificadas	
	Promedio	E.E.	Promedio	E.E.	Promedio	E. E.	Promedio	E. E.
Altitud	1564,92 ±	24,14	1539,31±	23,94	1664,57±	37,73	1688,64±	34,61
Dureza	16,30±	3,00	95,07±	77,10	10,56±	3,04	2,22±	0,31
Alcalinidad	197,71±	170,77	35,54±	8,37	115,67±	28,69	36,15±	7,75
Oxígeno disuelto	6,45±	0,44	4,74±	0,60	3,39±	0,63	3,32±	0,51
Temperatura	20,05±	0,24	20,13±	0,22	19,96±	0,27	19,41±	0,26
pH	5,64±	0,14	5,59±	0,19	6,26±	0,22	5,99±	0,15
Sólidos suspendidos	27,69±	7,97	23,60±	5,77	0,14±	0,03	0,10±	0,02
Canal activo mínimo	0,80±	0,26	0,82±	0,23	0,77±	0,17	1,16±	0,22
Canal activo máximo	4,53±	2,23	7,92±	3,97	1,69±	0,25	2,04±	0,32
Caudal	0,20±	0,03	0,12±	0,02	0,06±	0,01	0,06±	0,01
Velocidad	0,31±	0,04	0,33±	0,05	0,16±	0,03	0,18±	0,08
Sólidos totales	554,83±	101,26	4,81±	59,22	3,01±	0,94	30,36±	28,07
Color verdadero	31,00±	20,76	93,38±	63,62	27,62±	7,93	41,93±	19,45
DQO	39,81±	12,61	25,99±	7,80	20,33±	3,06	39,90±	7,84
DBO	5,36±	0,22	5,83±	0,23	10,41±	2,03	11,74±	2,68
SVAP	8,84±	0,32	6,56±	0,44	7,78±	0,51	5,59±	0,54
Cobertura de dosel	74,00±	2,33	57,08±	5,81	76,20±	4,45	57,65±	5,49
BMWP	118,46±	7,94	71,73±	7,62	65,00±	7,14	48,87±	6,18
EPT	6,12±	0,62	4,34±	0,56	3,54±	0,73	2,18±	0,50
ELPT	6,23±	0,68	3,76±	0,60	4,83±	0,97	3,23±	0,63

Por otra parte, la variable SVAP que evalúa la integridad física del entorno de los cuerpos de agua, arrojó diferencias estadísticas entre las fincas de las dos condiciones, demostrando mejores escenarios ambientales para las fincas Certificadas y percibiéndose similitud en los valores para los dos departamentos (Figura 3). Pese a que no se ilustran los intervalos de confianza para los valores de la evaluación del CIPAV, cabe anotar que sus resultados corroboran y respaldan los obtenidos con el SVAP, debido a que los valores fueron muy similares en estas dos variables, pues ambos usan los mismos criterios y puntajes.

Dentro de los criterios contemplados en la Norma de Agricultura Sostenible (28) para la conservación de ecosistemas acuáticos, adoptado por la certificadora ambiental RA, se contempla que los ecosistemas naturales tanto acuáticos como terrestres deben ser protegidos, conservados y recuperados mediante un programa de conservación. Igualmente la protección de los cauces naturales, mediante el establecimiento de zonas de protección en las riberas de ríos, arroyos, quebradas, lagos, humedales y en las orillas de otros cuerpos naturales de agua (entre 5 y 20 m) con vegetación riparia y cobertura de dosel ribereña que permitan la

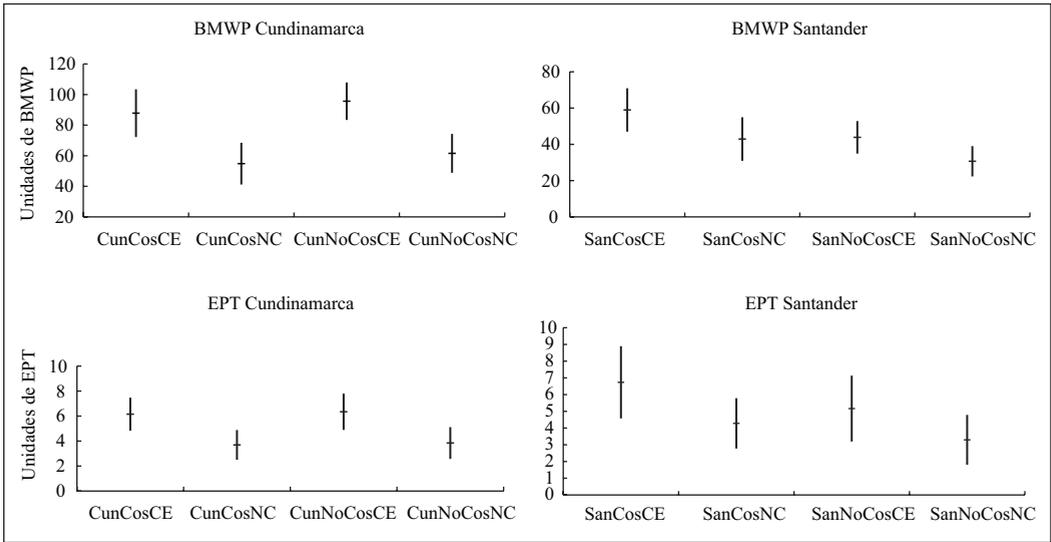


Figura 2. Intervalos de confianza para los índices bióticos BMWP y EPT en fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca y Santander, en época de cosecha y no cosecha.

estabilidad y la integridad de los ecosistemas acuáticos, sin realizar alteraciones del cauce, canalizaciones artificiales, desviaciones del mismo, represamientos artificiales y extracciones de material.

Dentro de las medidas para evitar la contaminación de las aguas están aquellas relacionadas con no realizar descargas de aguas residuales industriales o domésticas, desechos orgánicos o inorgánicos, ni basuras en cuerpos naturales de agua, sin demostrar que las aguas vertidas cumplen con los requisitos legales respectivos, y que sus características físicas y bioquímicas no degraden la calidad del cuerpo receptor de agua. Todos estos aspectos que pueden generar impactos negativos a los ecosistemas acuáticos y naturales pudieron ser medidos en cada una de las fincas evaluadas mediante el protocolo SVAP, complementado con los índices bióticos BMWP, EPT, ELPT y los análisis fisicoquímicos de calidad de aguas.

Consecuentemente, variables fisicoquímicas de vital importancia para el mantenimiento de la biota como el oxígeno disuelto presentó diferencias significativas a favor de las fincas Certificadas para Cundinamarca y Santander, respectivamente (Figura 3).

Los intervalos de confianza establecidos para la variable de oxígeno disuelto señalan diferencias significativas en favor de las fincas Certificadas de Cundinamarca, no obstante en Santander, no se encuentran estas diferencias. Es importante resaltar que los valores más altos de oxígeno disuelto obtenidos en Santander son similares a los que se observan en Cundinamarca para las fincas No Certificadas. Esto señala que aún en el mejor de los casos, no se están alcanzando niveles óptimos de saturación de oxígeno en las aguas para las fincas evaluadas en este departamento (Figura 3).

En cuanto a las variables fisicoquímicas restantes tan solo se obtuvieron diferencias

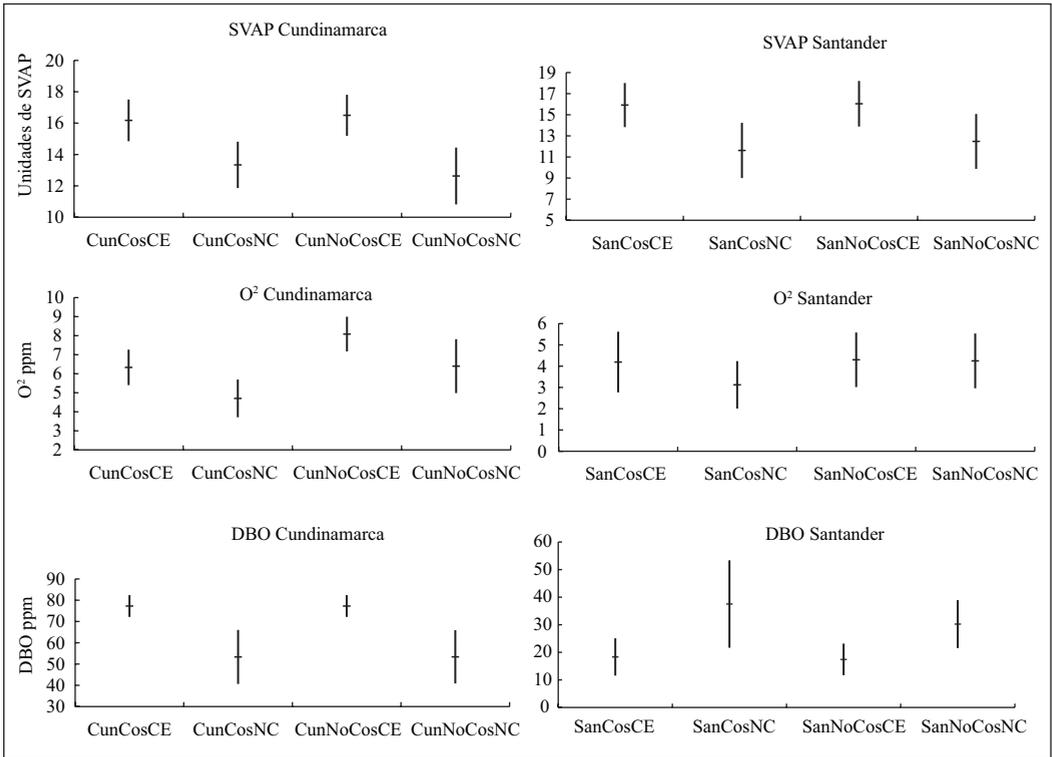


Figura 3. Intervalos de confianza para los índices fisicoquímicos SVAP, DBO y O₂ en fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca y Santander, en época de cosecha y no cosecha.

significativas estadísticamente en dureza y alcalinidad a favor de las fincas Certificadas de Santander. En general, tanto para las fincas Certificadas como No Certificadas en los dos departamentos, los valores de estas variables se encontraron en rangos normales (Tabla 6). La alcalinidad, está indicando valores bajos e intermedios según la escala de Kevern (1) para las fincas Certificadas y No Certificadas de Cundinamarca e igualmente para las fincas Certificadas de Santander, diferenciándose el grupo de las No Certificadas de este mismo departamento, cuyos valores más altos se encuentran en el rango de alcalinidad alta. En la prueba de dureza, el límite superior más alto fue de 34,6 mg.L⁻¹ de CaCO₃, encontrado en las fincas No Certificadas, y

de 27,3 mg.L⁻¹ en las fincas Certificadas. Estos valores, aunque son dependientes de diversos factores, se encuentran en rangos normales en todas las muestras. Dichos resultados son concordantes con los obtenidos por Rodríguez (33) quien demuestra valores bajos de dureza cuando hay niveles inferiores a 1.200 mg.L⁻¹ de DQO. Así mismo, los valores de alcalinidad presentaron una gran variabilidad al interior de los grupos de datos, no obstante, el límite superior encontrado para las fincas No Certificadas fue cercano a 300 puntos, más alto que el límite superior de las fincas Certificadas. La literatura señala que niveles inferiores a 200 pueden sugerir que el cuerpo de agua es muy vulnerable a contaminación por sustancias de bajo pH,

entre las que se encuentran las aguas mieles o residuales del café; aunque este caso no fue encontrado en ninguno de los dos grupos, sí es importante mencionar que para las fincas Certificadas, el límite inferior es más cercano a este valor y aunque puede estar mostrando aguas más puras, también señala cuerpos de agua más vulnerables, que requieren más atención y cuidado para evitar contaminación, ya que las aguas del beneficio del café son biodegradables, pero poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente, como pH bajo, acidez alta y concentraciones de materia orgánica altas, correspondiente a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas (35).

Al examinar los aspectos que tienen en cuenta las valoraciones visuales realizadas, se puede decir que evalúan propiamente el cumplimiento de los criterios críticos de la Norma de Agricultura Sostenible en cuanto a la conservación de los cuerpos de agua y de esta manera, los resultados obtenidos demuestran que la certificación por sí sola no garantiza la calidad del agua, sino el cumplimiento como tal de la norma implícita con la certificación. El SVAP y CIPAV evalúan directamente características físicas tangibles que deben estar presentes por el cumplimiento de la NAS (Norma de Agricultura Sostenible).

Análisis de similitud de Bray Curtis. Los cuerpos de agua que reflejan el cumplimiento de la norma NAS obtienen mejores calificaciones de SVAP/CIPAV, y de igual manera, estas fuentes de agua tienen en común muchos grupos de macroinvertebrados. Esta premisa se corroboró al realizar un análisis de similitud de Bray Curtis, en donde se contrastaron unidades de muestreo con especies encontradas y sus abundancias relativas, encontrando una tendencia a agrupar aquellos cuerpos de agua

que comparten características similares que les confieren determinados rangos de calidad de hábitat (Figura 4a).

Al parecer, en cada rango de calidad de hábitat existen comunidades de macroinvertebrados comunes por las cuales se están agrupando estos sitios de muestreo. Estas similitudes solo fueron encontradas para Cundinamarca, ya que al realizar el mismo análisis para las fincas de Santander no se observaron agrupaciones o tendencias importantes (Figura 4b).

Existen diferentes tipos de factores que originan los patrones del hábitat que controlan la distribución de las especies acuáticas y ribereñas, íntimamente relacionadas. Algunos de los factores que inciden en el hábitat son: La velocidad de la corriente, la profundidad y la temperatura, las cuales en la mayoría de los casos se mantienen y protegen por la cobertura vegetal; así como el contenido de oxígeno disuelto, el sustrato, la turbidez, la humedad y saturación del suelo, entre otras condiciones físicas, químicas y bióticas (31). En tal sentido, el manejo y conservación de la integridad del ecosistema no puede enfocarse exclusivamente hacia la corriente, sino que tiene que considerar integralmente su zona ribereña y todo su entorno físico.

De acuerdo a lo anterior, una posible explicación al resultado obtenido para Santander puede asociarse con el déficit hídrico ocurrido para los muestreos, ya que los caudales, velocidades y consecuentemente la oxigenación de los mismos se vieron modificados o afectados por estos períodos sin precipitaciones.

Índice de diversidad de Simpson. El índice de diversidad de Simpson o el inverso de Simpson, en este caso, se utilizó para medir la calidad del agua, considerando que un

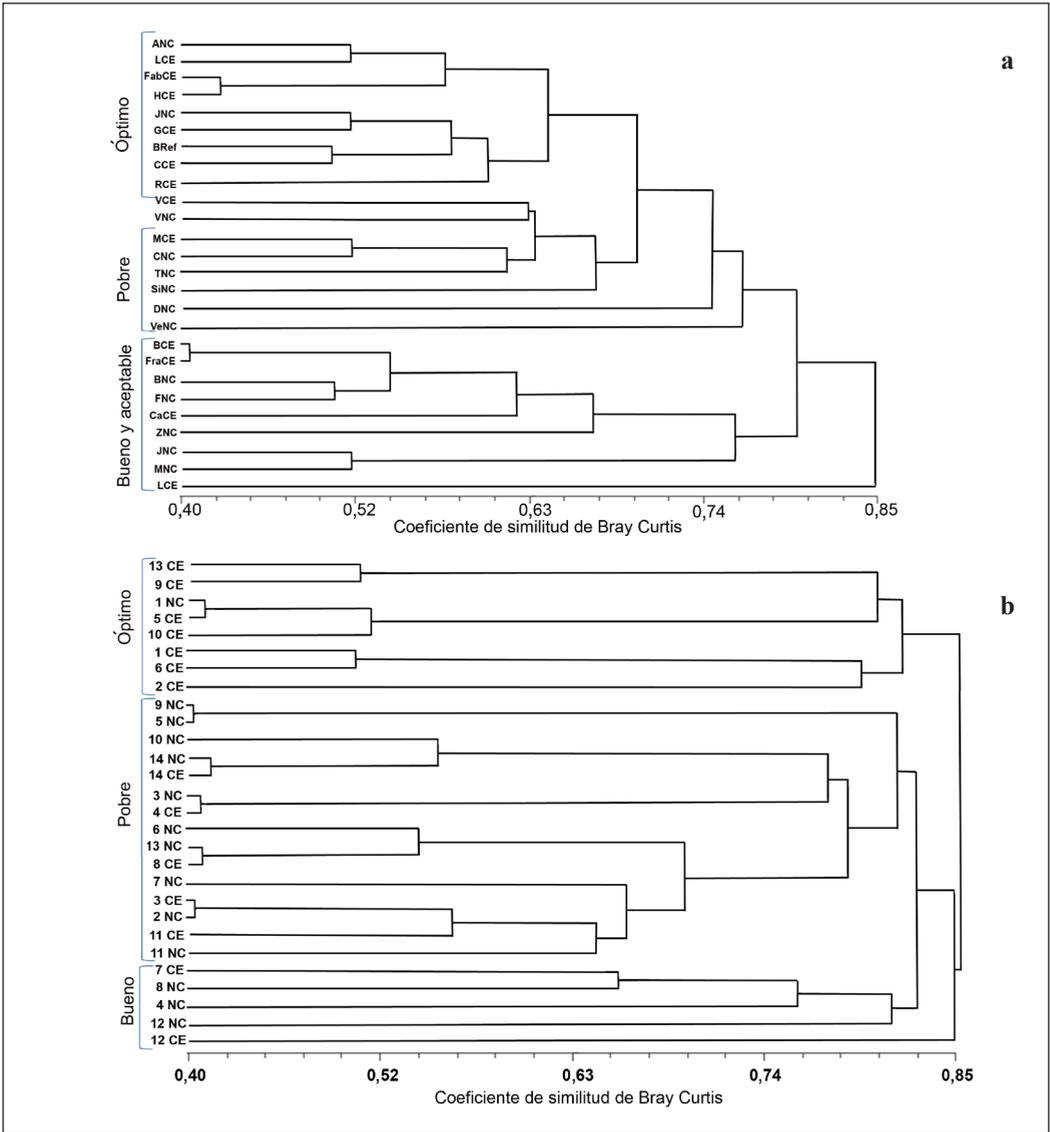


Figura 4. Dendrograma de similitud por medio del coeficiente de Bray Curtis. Tendencia a agrupar fincas de acuerdo a su categoría de SVAP para (a.) Cundinamarca y (b.) Santander.

hábitat no contaminado es caracterizado por una gran cantidad de especies, y no está representado por una o unas pocas especies que se muestren dominantes o más abundantes que las demás que componen la comunidad.

Después de examinar la diversidad en una gama de quebradas contaminadas y no contaminadas, diversos autores han sugerido que un valor de $1/D$ mayor que 16, indica aguas limpias, valores entre 10 y 15 son característicos de condiciones moderadamente

contaminadas y valores menores a 9 indican condiciones fuertemente contaminadas. Para este índice el estado óptimo de un ecosistema es aquel en el que las especies encontradas tienen una abundancia proporcional y no hay una sola o unas pocas especies que estén dominando en la comunidad. Para el caso del presente estudio, se encontraron mayores valores del inverso de Simpson para algunas fincas No Certificadas con respecto a su par certificado (Figura 5). Estos resultados sugieren una mejor estructura en las comunidades de macroinvertebrados en esos cuerpos de agua y por lo tanto mejor calidad del mismo; sin embargo, al analizar la estructura de abundancias de las fincas No Certificadas se encontró que dentro de las familias más abundantes en estas comunidades de macroinvertebrados, dominan grupos de baja categoría en el BMWP, es decir, dominan grupos que son más tolerantes a la contaminación (Figura 6).

En contraste, al examinar la estructura de abundancias para algunas de las fincas Certificadas que presentan valores de diversidad

de Simpson menores con respecto a las No Certificadas, se encontraron dentro de las familias más abundantes aquellas menos tolerantes a la contaminación (Figura 7). Lo anterior demuestra que el uso de índices de diversidad basados en la abundancia relativa de las especies que conforman una determinada comunidad no es lo más conveniente, ya que discrimina o señala como poco diversos los cuerpos de agua con dominancia alta de unas pocas especies, aun cuando esto sea una condición natural y refleje una estructura saludable.

Gremios funcionales. La dominancia de determinados grupos de macroinvertebrados bentónicos refleja el buen estado de un ecosistema acuático. Según la Teoría del Río Continuo (34), los cuerpos de agua de cabecera están influenciados fuertemente por la vegetación ribereña y cobertura de dosel que le aportan grandes cantidades de detritos (hojarasca, raíces, ramas, troncos); conforme aumenta el tamaño del cuerpo de agua se reduce el aporte de insumos orgánicos de origen terrestre,

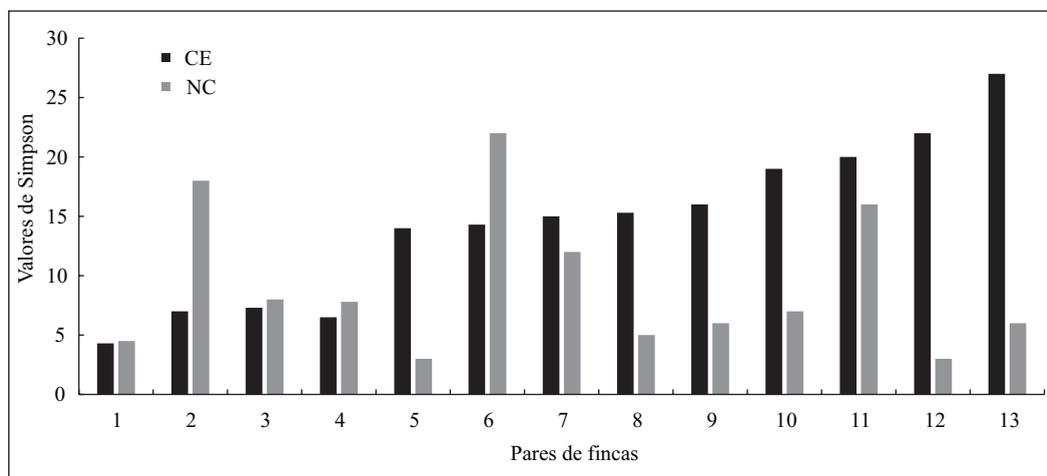


Figura 5. Valores del inverso de Simpson para cada bloque (Fincas Certificadas-CE y No Certificadas-NC) en Cundinamarca.

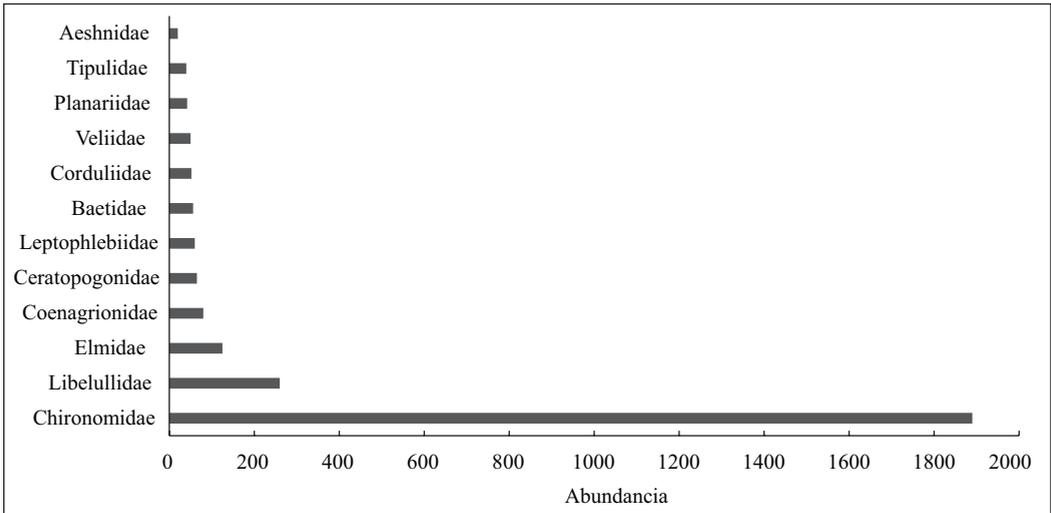


Figura 6. Familias más abundantes en un cuerpo de agua de una finca No Certificada con predominio de grupos que son más tolerantes a la contaminación.

es decir, del entorno del cuerpo de agua y así mismo se incrementa la producción primaria. De esta manera, diferentes grupos o gremios dominan en cada rango del cuerpo de agua obedeciendo al gradiente de concentración de nutrientes y materia orgánica. De acuerdo a lo anterior, se establece que en los ríos o cuerpos de agua de primer a tercer orden dominan (en términos de biomasa) los grupos de colectores y trituradores que se encargarán de transformar y hacer aprovechables los nutrientes para las comunidades de organismos que se encuentran en las partes bajas de los ríos (cuerpos de agua de cuarto grado en adelante). En síntesis, en los cuerpos de agua de primer a tercer orden dominan los colectores y en menor proporción trituradores. La proporción de colectores disminuye en los cuerpos de agua de cuarto orden y se incrementa la de raspadores (Figura 8).

Análisis de correlación de Pearson (P de r). La totalidad de las fincas Certificadas

no alcanzaron valores apropiados de calidad de agua, y de igual manera no todas las fincas No Certificadas obtuvieron valores bajos de las variables evaluadas y existe una proporción que arroja valores significativos de calidad según los índices bióticos y físicos (Figuras 9 y 10).

Se observó que las variables de calidad del agua medidas con base en la comunidad de macroinvertebrados (BMWP, EPT y ELPT) están influenciadas o correlacionadas por casi todas las otras variables de manera positiva o negativa. De acuerdo a esto, variables como el oxígeno disuelto, el SVAP (características físicas), la cobertura de dosel, el DBO, los sólidos suspendidos, entre otros, intervienen en la calidad del agua significativamente. De esta manera se demuestra que para la integridad de los ecosistemas de agua dulce, es necesario el control de la contaminación, pero no es suficiente, es decir, no solo es importante el cuidado de la corriente sino de todo el entorno físico del ecosistema.

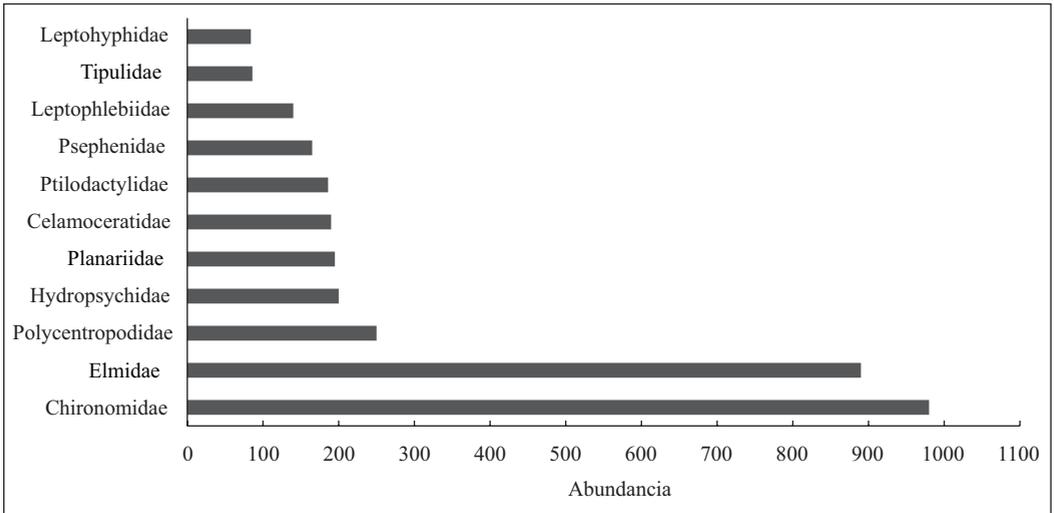


Figura 7. Familias más abundantes en un cuerpo de agua de una finca Certificada con predominio de grupos que son menos tolerantes a la contaminación.

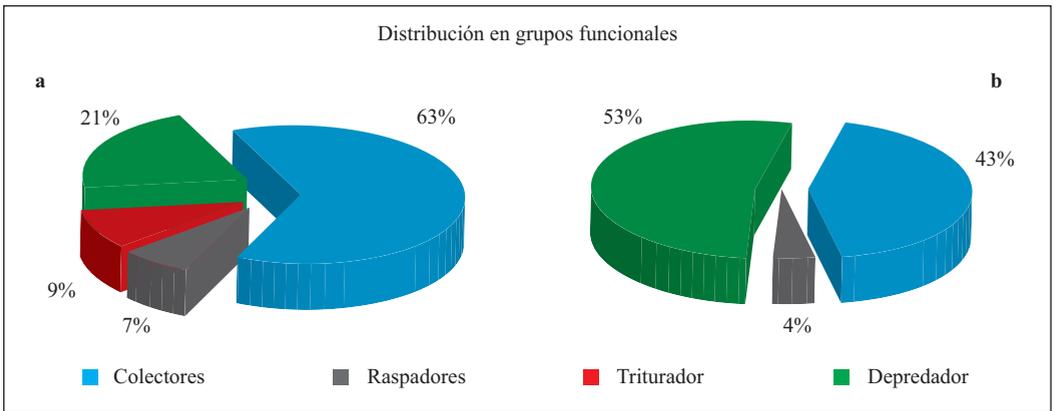


Figura 8. Distribución de grupos funcionales en los cuerpos de agua de primer orden muestreados. **a.** Abundancias generales de grupos funcionales; **b.** Caso atípico de abundancias encontrado en una de las fincas No Certificadas.

Por otra parte, se puede inferir que la calidad del entorno de un cuerpo de agua (SVAP) contribuye a mantener adecuados niveles de oxígeno disuelto, como lo demuestra la correlación positiva del 40% que existe entre estas dos variables. Consecuentemente, los valores de DBO (contaminación orgánica susceptible de ser degradada por

microorganismos), sólidos suspendidos y color del agua, son más bajos en la medida que el cuerpo de agua cuenta con buen entorno físico, lo cual incluye el mantenimiento de bordes de vegetación riparia y barreras, que probablemente evitan y amortiguan el efecto de los contaminantes por las prácticas agrícolas o la intervención antrópica.

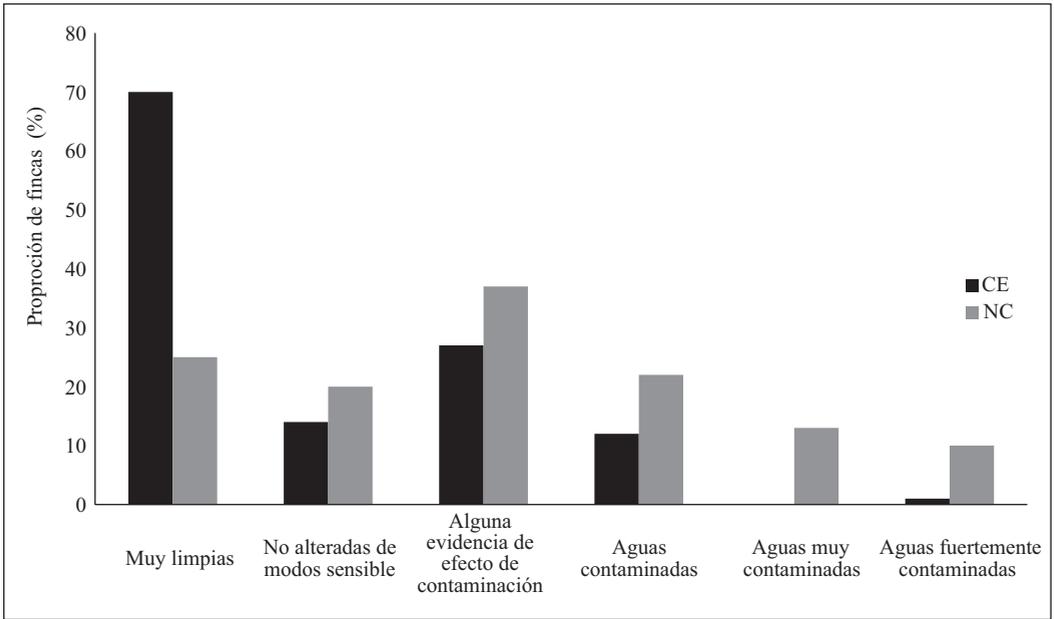


Figura 9. Proporción de Fincas Certificadas (CE) y No Certificadas (NC) en las categorías de calidad de aguas propuestas para el índice BMWP, con base en la comunidad de macroinvertebrados en fincas de Cundinamarca.

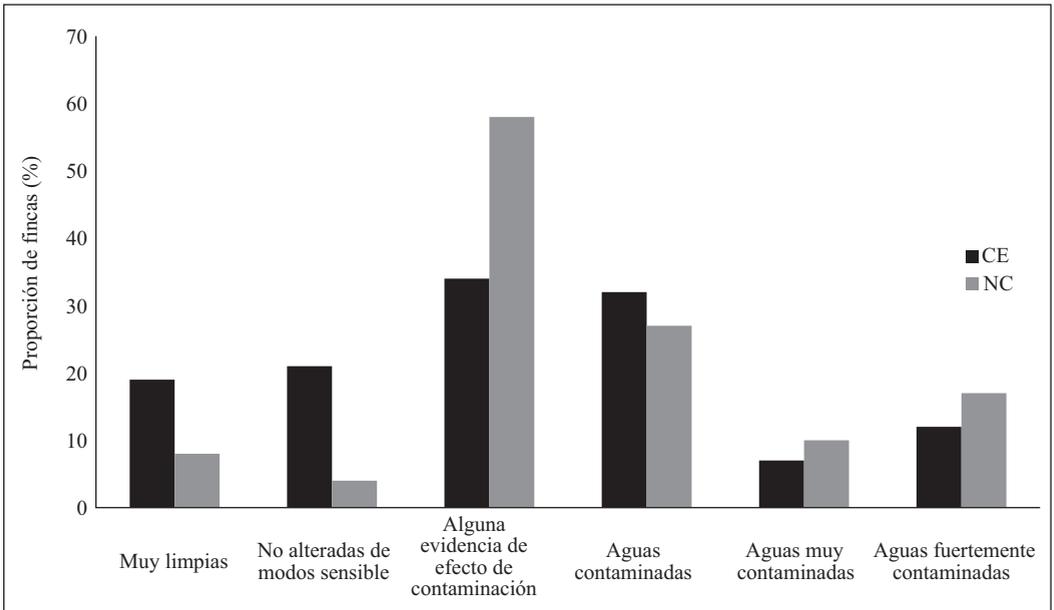


Figura 10. Proporción de Fincas Certificadas y No Certificadas en las categorías de calidad de aguas propuestas para el índice BMWP con base en la comunidad de macroinvertebrados en fincas de Santander.

De la misma manera que con el SVAP/ CIPAV, algunas variables cuyos valores bajos pueden señalar fuentes de contaminación, tienen una correlación inversa con los índices de calidad de agua BMWP, EPT y ELPT, lo que indica que este tipo de contaminación ejerce una presión directa sobre la comunidad de macroinvertebrados menos tolerantes a la contaminación. Así mismo, sobre los macroinvertebrados se observa una presión directa por la contaminación orgánica como lo señala la correlación negativa (-32%) entre estos últimos y la variable DBO.

De acuerdo a esto se deduce que los valores bajos que obtienen algunas fincas, de manera independiente a la certificación, obedecen a las transformaciones o presión ejercida sobre el cauce. En la mayoría de los casos estas transformaciones consisten en la interrupción parcial o total de la escorrentía o cauce, cambios de condición lítica a léntica, pérdida de caudal por infiltración causada al desviar el cauce sobre terrenos inadecuados.

Adicionalmente, las transformaciones mencionadas conllevan a la acumulación de materia orgánica (por la falta de circulación) que inicia un proceso de descomposición consumiendo también una buena parte del oxígeno disuelto presente en el agua, lo que se refleja en el incremento de los valores de DBO y otras características fisicoquímicas (como los sólidos en suspensión, la dureza, entre otros), los cuales afectan de manera directa las comunidades de macroinvertebrados cuyas especies menos tolerantes desaparecen (37), quedando representados por aquellos grupos que soportan en mayor grado la contaminación y que arrojan bajos valores de BMWP, indicando una baja calidad del agua.

Se puede concluir que:

Los macroinvertebrados acuáticos son importantes como indicadores de las condiciones ambientales, ya que su presencia refleja las condiciones que prevalecen en el ambiente donde viven, como las condiciones físicas, químicas y bióticas, además de las diferentes presiones sobre los ecosistemas naturales (19, 32). En este estudio las familias de macroinvertebrados acuáticos que fueron más sensibles y que mejor respondieron a los cambios de perturbación de hábitat y a la contaminación del agua en Santander y Cundinamarca fueron las familias Perlidae (Plecoptera), Oligoneuriidae, Baetidae, Leptoxyphidae, Leptophlebiidae, Euthyplociidae (Ephemeroptera), Calamoceratidae, Helicopsychidae, Odontoceridae, Philopotamidae, Anomalopsychidae, (Trichoptera), Psephenidae, Ptilodactylidae, Elmidae (Coleoptera), Blepharoceridae (Diptera), Polythoridae, Gomphidae, Aeshnidae, Calopterygidae (Odonata) y Corydalidae (Megaloptera).

La Norma de Agricultura Sostenible tiene un efecto tangible, cuantificable y positivo sobre la calidad del agua y del hábitat en un ecosistema acuático y de rivera; de tal manera que su cumplimiento contribuye con el sostenimiento de comunidades de macroinvertebrados bioindicadores. Esto puede concluirse con base en los resultados obtenidos para Cundinamarca y Santander, en donde se encontraron diferencias significativas al construir intervalos de confianza y aplicar el estadístico de prueba *t*, favoreciendo las fincas Certificadas con respecto a las No Certificadas en algunas de las variables más importantes de las 24 analizadas, como el BMWP y SVAP/CIPAV.

Sin embargo, la certificación por sí sola no es suficiente, sino que es el cumplimiento

de la norma lo que repercute en mejores condiciones y calidad de los ecosistemas acuáticos, lo cual es demostrado por la relación existente entre estas dos variables, ya que existe una correlación directa y significativa entre el cumplimiento de la norma (mantenimiento del bosque ripario, la cobertura de dosel, el cuidado del cauce, etc.) que de una manera directa es evaluado por los índices físicos SVAP y CIPAV, y la calidad del cuerpo de agua para sostener una comunidad de macroinvertebrados, la cual fue evaluada con los índices bióticos BMWP, EPT y ELPT. Estas correspondencias son corroboradas al relacionar gráficamente dos de estas variables (Figura 11). En principio, su comportamiento lineal demuestra que un incremento en el SVAP/CIPAV va acompañado de un crecimiento proporcional en la variable BMWP y viceversa. De la misma manera, las líneas de tendencia lineal (regresión lineal) demuestran la existencia de una relación directamente proporcional respaldada por

unos valores de R^2 superiores a 0,6 (Figura 11 b y d).

Estas diferencias entre las fincas Certificadas y No Certificadas demuestran las bondades de los criterios que componen la Norma de Agricultura Sostenible en cuanto a la conservación de ecosistemas acuáticos, de modo que su cumplimiento se refleja en hábitat de mejores atributos con posibilidades de sostener cuerpos de agua con buena calidad. No obstante, no se descarta la idea de sugerir un fortalecimiento de la norma, complementando las instrucciones referentes al mantenimiento de la cobertura de dosel, al respeto por el borde ripario y al uso inadecuado del recurso, evitando las transformaciones, ya que los criterios referentes a los vertimientos contaminantes, hasta donde se observó, se cumplen de manera sistemática.

En este contexto, la utilización de los macroinvertebrados bentónicos como

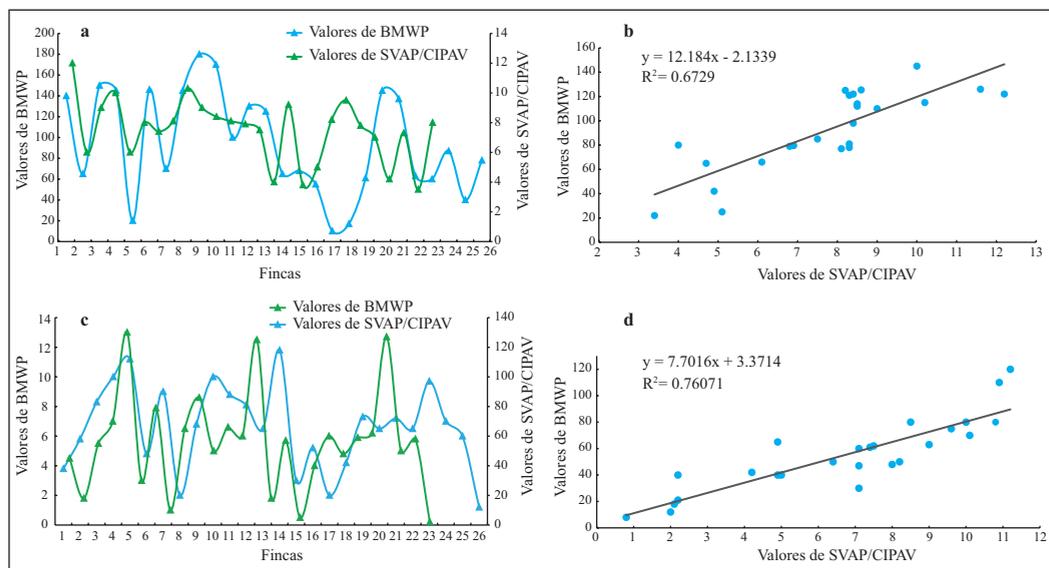


Figura 11. Graficas de correlación entre la protección de las fuentes y la calidad del agua, para las variables BMWP y SVAP/CIPAV en fincas cafeteras de Cundinamarca (a, b) y Santander (c, d).

indicadores de la alteración hidrológica y la calidad del agua, se constituye en una valiosa herramienta que permite aportar información para evaluar las interrelaciones entre los fenómenos del flujo y las respuestas bióticas, con el objeto de conservar los ecosistemas acuáticos y su biodiversidad dentro de rangos de variabilidad natural. Los índices bióticos BMWP, EPT y ELPT se establecen como instrumento viable y apropiado para la cuantificación y evaluación de la calidad del agua, en cuerpos de agua pequeños de origen andino. Así mismo, los protocolos de valoración visual representan el complemento adecuado para las evaluaciones de estos sitios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Jorge Eduardo Botero de la Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación, y Cesar Serna de la Disciplina de Economía de Cenicafé, por sus aportes en la planeación del experimento y asesoría. A David Hughell y Rebecca Butterfield de *Rainforest Alliance* por la asesoría y apoyo. A Luis Gabriel Pérez, Gustavo Zabala, Jhon Félix Trejos, José E. Gómez, Jairo Hernán Henao, colaboradores de Cenicafé, por el apoyo en la toma de datos en el campo y laboratorio, a los Comités de Cafeteros, extensionistas y caficultores de Cundinamarca y Santander, por el apoyo logístico para la recolección de muestras de macroinvertebrados acuáticos (permiso de investigación científica en diversidad biológica No. 20 del 18 de noviembre de 2009 otorgado por el Ministerio del Medio Ambiente). Esta investigación fue financiada por la Federación Nacional de Cafeteros, el Centro Nacional de Investigaciones de Café y *Rainforest Alliance* en el experimento ENT 1510 de Cenicafé en el convenio GEF/PNUD/*Rainforest Alliance* "Biodiversity Conservation in Coffee: transforming productive practices

in the coffee sector by increasing market demand for certified sustainable coffee" (PIMS 3083).

LITERATURA CITADA

1. APHA; AWWA; WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid : Díaz de Santos, 1990. 1010 p.
2. ARMITAGE, P.D.; MOSS, D.; WRIGHT, J.F.; FURSE, M.T. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of polluted running-water sites. *Water. Res.* 17(3):33-347. 1983.
3. ALBA T., J.; SÁNCHEZ O., A. Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hellowell (1978). *Limnetica* 4:51-56. 1988.
4. ALBA T., J.; SÁNCHEZ O., A. Caracterización del estado ecológico de ríos mediterráneos ibéricos mediante el índice IBMWP (antes BMWP). *Limnetica* 21(3/4):175-185. 2002.
5. ALTIERI, M. Agro ecología: Bases científicas para una agricultura sustentable. La Habana : CLADES, 1997. 249 p.
6. ARCILA, O.F. Determinación de las sustancias contaminantes de las aguas del beneficio del café. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades de la disciplina de química industrial. Chinchiná : CENICAFÉ, 1975. 19 p.
7. ARCILA, O.F. Tolerancia de algunos animales acuáticos a las aguas del beneficio del café. En: CENICAFÉ. Informe final de la disciplina de química industrial. Chinchiná : CENICAFÉ, 1983. 10 p.
8. BARBOUR, M.T.; GERRITSEN, J.; SNYDER, B.D.; STRIBLING, J.B. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, Benthic macroinvertebrates and fish EPA 841-B-99.002. Washington : Environmental protection agency, 1999. 89 p.
9. BARÓN, J.; [et al.]. Sustaining healthy freshwater ecosystems: Issues in ecology. *Ecological society of America* 10:1-16. 2003.
10. BRAGA, G. Forma y equilibrio sociales: Extracto del libro tratado de sociología general de Wilfredo Pareto. Madrid : Alianza, 1980. 135 p.

11. CHARÁ, J. Manual de evaluación biológica de ambientes acuáticos en microcuencas ganaderas: Protocolo CIPAV. 2a. ed. Cali : Fundación CIPAV, 2004. 52 p.
12. CIESE. Stevens institute of technology. [En línea]. Disponible en Internet: <http://www.ciese.org/curriculum/dipproj2/es/fieldbook/oxigeno.shtml>. Consultado en Septiembre de 2007.
13. DOMÍNGUEZ, E.; FERNÁNDEZ, H. Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología. Tucumán: Fundación Miguel Lillo, 2009. 654 p.
14. ENKERLIN, E.C.; CANO, G.; GARZA, R.A.; VOGEL, E. Ciencia ambiental y desarrollo sostenible. México : International Thomson, 1997. 665 p.
15. GUERRERO, B.F.; MANJARES, H.A.; NÚÑEZ, N. Los macroinvertebrados bentónicos de Pozo azul (Cuenca del río Gaira, Colombia) y su relación con la calidad del agua. Acta biológica colombiana 8(2):43-55. 2003.
16. GORDON, C.; MANSON, R.; SUNDBERG, J.; CRUZ A., A. Biodiversity, profitability, and vegetation structure in a mexican coffee agroecosystem. Agriculture, ecosystems and environment 118:256–266. 2007.
17. HUGHES, F.M.R.; COLSTON, A.; OWEN, J. Restoring riparian ecosystems: The challenge of accommodating variability and designing restoration trajectories. Ecology and society 10(1):1-12. 2005.
18. INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT. Caracterización de la biodiversidad en áreas prioritarias de la vertiente oriental de la cordillera Oriental. [En línea]. Villa de Leiva : Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt, 1999. 25 p. Disponible en internet: <http://www.humboldt.org.co/humboldt/homeFiles/inventarios/VOCO.pdf>. Consultado en Enero de 2006.
19. IDEAM. Evidencias del cambio climático en Colombia: Definición de herramientas para enfrentar el cambio climático en el sector agropecuario. Bogotá : IDEAM, 2009. 24 p.
20. KLEMM, D.J.; LEWIS, P.A.; FULK, F.; LAZORCHAK, J.M. Macroinvertebrate field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters: EPA/600/4-90/030. Ohio : Environmental protection agency : Environmental monitoring systems laboratory, 1990. 124 p.
21. LIÉVANO, L.A.; OSPINA, T.R. Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón. Bogotá : Universidad del Bosque : Instituto Alexander von Humboldt, 2007. 130 p.
22. LUDWIG, J.A.; REYNOLDS, J.F. Statistical ecology. Nueva York : John Wiley & Sons, 1988. 337 p.
23. MATUK, V. El impacto biológico de las aguas residuales del lavado del beneficio húmedo de café tratadas anaerobiamente. Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ciencias básicas, 1996. 287 p. Tesis: Biólogo
24. MONTGOMERY, D.R.; BOLTON, S.M. Hydrogeomorphic variability and river restoration. p. 39-80. En: WISSMAR, R.C.; BISSON, P.A. Strategies for restoring river systems. Bethesda : The American fisheries society, 2003.
25. NATIONAL WATER AND CLIMATE CENTER. Stream visual assessment protocol: Technical note 99-1. Connecticut : NWCC : USDA : NRCS, 1998. 36 p.
26. PALMER, M.A.; [et al.]. Standards for ecologically successful river restoration. Journal of applied ecology 42:208–217. 2005.
27. PERFECTO, I.; VANDERMEER, J.; MAS, A.; PINTO, L.S. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. Ecological economics 54:435–46. 2005.
28. RAINFOREST ALLIANCE. Norma de agricultura sostenible: Red de agricultura Sostenible Rainforest Alliance 2008. [En línea]. Disponible en Internet: www.ra.org. Consultado en Noviembre de 2009.
29. RINCÓN, M.E. Estudio preliminar de la distribución altitudinal y espacial de los tricópteros en la cordillera Oriental (Colombia). p. 267-284. En: AMAT, G.; ANDRADE, M.G.; FERNÁNDEZ, F. Insectos de Colombia. Bogotá : Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales, 1999.
30. RISS, W.; OSPINA, R.; GUTIÉRREZ, J.D. Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la sabana de Bogotá. Caldasia 24(1):135-156. 2002.
31. RITCHER, B.; BAUMGARTNER, J.; WIGINGTON, R. How much water does a river need? Freshwater biology 37:231-249. 1997.

32. Roldán, P.G. Bioindicación de la calidad de agua en Colombia: Uso del método BMWP/Col. Medellín : Universidad de Antioquia, 2003. 170 p.
33. RODRÍGUEZ, N. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente, 2009. 508 p. Tesis doctoral.
34. VANNOTE, R.; MINSHALL, G.W.; KUMMINS, K.W.; SEDELL, J.R.; CUSHING, C.E. The river continuum concept. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* 37:130-137. 1980.
35. ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N. Sistemas para el tratamiento de aguas mieles: Investigación aplicada en beneficio de los productores cafeteros. Chinchiná : CENICAFÉ, 2008.
36. ZÚÑIGA, M.; ROJAS, A.; CAICEDO, G. Indicadores ambientales de calidad de agua en la cuenca del río Cauca. *Asociación de ingenieros sanitarios de Antioquia* 2:17-28. 1993.
37. ZÚÑIGA, M.C.; CARDONA, C. Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental: Conceptos, experiencias y desafíos. p: 167-197. Cali : Universidad del Valle, 2009.

INTERCAMBIO GASEOSO EN *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* Y *Pachira quinata* EN COLOMBIA

Angela María Castaño Marín*, Héctor Alberto Chica Ramírez**, Diego Obando Borilla***,
Néstor Miguel Riaño Herrera****

RESUMEN

CASTAÑO M., A. M.; CHICA R., H. A.; OBANDO B. D.; RIAÑO H. N. M. Intercambio gaseoso en *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* y *Pachira quinata* en Colombia. Revista Cenicafé 63 (1): 93-110. 2012

En *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* y *Pachira quinata* se evaluaron en el campo las relaciones entre la fotosíntesis o asimilación neta de CO_2 (A) con las variables transpiración (E), conductancia estomática (g_s), radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura de la hoja (T_L) y déficit de presión de vapor de aire (DPV). La fotosíntesis tuvo un comportamiento asintótico con el aumento de g_s en *C. alliodora* y fue lineal con plato en *A. acuminata*. Para *P. quinata* igualmente fue lineal. Los modelos en tres dimensiones A frente a T_L versus RFA , mostraron una asimilación máxima (Am) para *C. alliodora* de $20,41 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a $26,5^\circ\text{C}$ y $1.350 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. En *A. acuminata* la Am ($24,13 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) se alcanzó a $25,54^\circ\text{C}$ y $1.954,6 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. En *P. quinata* la Am ($13,0 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) se registró con $1.192 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, pero para el rango de datos de T_L no fue posible determinar un valor de temperatura de saturación. Al evaluar la asimilación frente al DPV versus RFA , se encontró que en *C. alliodora* se alcanzó una Am ($26,89 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) con un ambiente saturado de humedad ($DPV=0,0\text{mb}$) a $1.320 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, en *A. acuminata*, la Am ($22,24 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) se alcanzó con $8,21\text{mb}$ de DPV y $1.418 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, y en *P. quinata* la Am ($16,55 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) se alcanzó a $1.276 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sin influencia del DPV en la Am alcanzada para el rango de datos analizados en esta especie. La significancia estadística ($p < 0,0001$) de los parámetros evaluados permite que los valores asociados puedan ser utilizados para alimentar el modelo de crecimiento y captura de carbono CREFT V 2.0

Palabras clave: Conductancia estomática, déficit de presión de vapor de agua, temperatura de la hoja, radiación fotosintéticamente activa.

ABSTRACT

The relationships between photosynthesis or CO_2 assimilation (A) and the variables transpiration (E), stomatal conductance (g_s), photosynthetically active radiation (PAR), leaf temperature (T_L) and air vapor pressure deficit (VPD) were evaluated in *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* and *Pachira quinata* under field conditions. Photosynthesis showed an asymptotic behavior with the increase of g_s in *C. alliodora* and it was linear with plateau in *A. acuminata*. *P. quinata* was also linear. The tridimensional models A vs. T_L versus PAR showed a maximum absorption (Ma) for *C. alliodora* $20.41 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ at 26.5°C and $1.350 \mu\text{mol}(\text{photons})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. In *A. acuminata* the Ma ($24.13 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) was reached at 25.54°C and $1,954.6 \mu\text{mol}(\text{photons})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. In *P. quinata* the Ma ($13.0 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) was reached at $1.192 \mu\text{mol}(\text{photons})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, but it was not possible to determine a saturation temperature value for the data range of T_L . In assessing the assimilation of VPD vs. PAR , *C. alliodora* showed a Ma ($26.89 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) with a saturated humidity atmosphere ($VPD = 0.0\text{mb}$) at $1.320 \mu\text{mol}(\text{photons})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, in *A. acuminata* the Ma ($22.24 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) was reached with VPD and 8.21mb of $1.418 \mu\text{mol}(\text{photons})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, and in *P. quinata* the Ma ($16.55 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) was reached at $1.276 \mu\text{mol}(\text{photons})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ without the influence of VPD on the Ma reached for the range of data analyzed in this species. Statistical significance ($p < 0.0001$) of the evaluated parameters allows using the associated values to feed the growth and carbon sequestration model CREFT V 2.0

Keywords: Stomatal conductance, water vapor pressure deficit, leaf temperature, photosynthetically active radiation.

* Ingeniera Agrónoma, estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales –Universidad del Cauca –Red Interinstitucional de Cambio Climático y Seguridad Alimentaria –RICCLISA.

** Ingeniero Agrónomo MSc. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). Valle del Cauca, Colombia.

*** Ingeniero Forestal. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira, Colombia.

**** Investigador Científico III. Coordinador Programa Caficultura y Variabilidad Climática. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La fotosíntesis es el proceso por el cual las plantas verdes, las algas y algunas bacterias utilizan la energía lumínica, el dióxido de carbono y el agua para generar carbohidratos, los cuales son la base de su crecimiento, desarrollo y reproducción. Aproximadamente el 50% de la materia seca de las plantas está compuesta de carbono fijado en la fotosíntesis, por lo tanto es vital para el crecimiento y sostenimiento de todas las plantas y, en general, para la vida en la Tierra (15). El proceso fotosintético es el principal responsable de la fijación de carbono de la atmósfera, lo cual resalta la importancia de los bosques naturales y las plantaciones forestales como grandes sumideros de CO₂, más aun cuando la Tierra se enfrenta ante un evidente cambio climático ocasionado en gran parte por el calentamiento global que causan los gases efecto invernadero, como el dióxido de carbono.

Globalmente la década de 1990 y particularmente el año 1998, han sido registrados como los años más calientes desde 1861. Estimaciones recientes de la NASA y el *National Climatic Data Center* muestran que 2005 y 2010 fueron los años más calurosos del planeta desde que las mediciones instrumentales fiables están disponibles a partir de finales del siglo XIX, superando a 1998 por unas centésimas de grado (20). La temperatura medida por sondas atmosféricas en los primeros 8 km sobre la superficie, desde 1950, muestra incrementos del orden de 0,1°C por década. A partir de 1979, los datos recolectados por satélites y sondas atmosféricas muestran que la temperatura global en los mismos 8 km ha cambiado +0,5±0,1°C por década, pero el promedio de la temperatura superficial se ha incrementado significativamente en +0,15±0,05°C por década, principalmente en las regiones tropicales y subtropicales (14). El dióxido de carbono (CO₂) se ha

incrementado en un 31% desde 1750. La tasa de incremento ha sido de 1,5 ppm año⁻¹[$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{aire})$] en las dos décadas pasadas. Esta concentración no había sido incrementada a esa tasa durante los últimos 420.000 años y menos durante los últimos 20.000.000 de años. Alrededor de las tres cuartas partes de las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera, durante los pasados 20 años, son debidas a la quema de combustibles fósiles, la restante tercera parte se debe a cambios en el uso del suelo, especialmente a la deforestación (14). Estimaciones recientes indican que si se mantiene el ritmo de aumento, para el año 2100 el CO₂ ambiental alcanzará valores de 540 – 970 ppm [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{aire})$] (6, 7, 8, 9,12, 14, 23).

La captación de CO₂ por los ecosistemas vegetales terrestres constituye un componente importante en el balance global de carbono. A escala mundial se considera que la biósfera terrestre fija cerca de 2.000.000 toneladas de CO₂ por año, valor resultante de la pequeña diferencia entre la absorción fotosintética de CO₂ y las pérdidas por respiración, por descomposición de la materia orgánica y por perturbaciones de diferente naturaleza. A este valor se le denomina producción neta de la biósfera (PNB), y es la cantidad que a largo plazo queda almacenada en el sumidero.

El CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y el CO₂ emitido a la atmósfera durante la respiración. Esta diferencia es convertida en biomasa y suele oscilar entre el 45%-50% del peso seco de la planta. Por lo tanto, mientras el crecimiento esté activo, la vegetación natural, los cultivos agrícolas y las plantaciones forestales se convierten en los sumideros de carbono.

Teniendo esto en cuenta, la agricultura se puede convertir en un mecanismo efectivo para mitigar el incremento del CO₂ atmosférico (27).

Dentro de la búsqueda de estrategias que ayuden a mitigar efectos del cambio climático como el calentamiento global, por gases como el CO₂, se han desarrollado modelos computacionales que predicen la interceptación de carbono de algunas especies de plantas. Uno de estos modelos es el CREFT “modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico”, el cual es una herramienta diseñada en Colombia, que además de cuantificar la captura de carbono, predice el crecimiento de algunas especies forestales nativas e introducidas en condiciones del trópico. El modelo calcula la biomasa y composición mineral, incluido el carbono, en cada uno de los compartimentos, mediante la simulación de procesos físicos y fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración, la partición de los asimilados y el crecimiento foliar, entre otros, a partir de información climática (brillo solar diario, temperatura máxima y mínima diaria), y de localización del sitio de siembra de la plantación (latitud, longitud y altitud) (22).

Dentro de las especies que se han trabajado en el desarrollo del modelo CREFT, se encuentran *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* y *Pachira quinata*.

El nogal cafetero (*C. alliodora*) es una de las especies más importantes en áreas de reforestación en el país, y es utilizada principalmente en la zona cafetera en asocio con café (*Coffea arabica* L.) para establecimiento de sombrío y aprovechamiento comercial de su madera. Crece desde el norte de México hasta Paraguay, sur de Brasil y el norte de Argentina, y está ampliamente distribuido en

las islas del Caribe. Esta especie se adapta mejor en zonas de bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical, donde el rango de la precipitación media anual es desde 1.000 a 4.000 mm y la temperatura media anual es de 25,0°C. El rango altitudinal del nogal se extiende desde casi el nivel del mar, en varios países, hasta una elevación de 1.900 metros en zonas altas de Colombia (1).

A. acuminata, conocido como aliso o cerezo en Colombia, es una especie importante para la recuperación de cuencas hidrográficas, además de tener un gran potencial en la producción de madera. Esta especie es ampliamente distribuida en América en zonas de media y alta montaña, desde México hasta el norte de Argentina, en Colombia se encuentra en las cordilleras Central y Oriental. Puede plantarse con altitudes entre 1.600 y 3.200 m, con una temperatura media anual entre 4 y 18°C tolerando temperaturas máximas de 27,0°C (2).

La ceiba tolua (*P. quinata*) crece naturalmente en el sur de Honduras, al oeste de Nicaragua y Costa Rica, en la zona central de Panamá, en Venezuela y al Norte y Este de Colombia. Su rango altitudinal está entre los 0 y 400 m, con precipitaciones medias entre 800 y 3.000 mm anuales y temperatura promedio anual de 27,5°C. Es una especie muy apreciada por su durabilidad y facilidad para trabajarla (29).

El objetivo de este estudio fue cuantificar y determinar para estas tres especies nativas la fotosíntesis (Asimilación (*A*) y Respiración oscura (*Rd*)) y su relación con la transpiración (*E*), la Radiación Fotosintéticamente Activa (*RFA*), la conductancia estomática (*gs*), la concentración de CO₂ intercelular (*Ci*), la temperatura de la hoja (*T_l*) y el déficit de presión de vapor de agua (*DPV*). Los valores hallados actualizarán y alimentarán

la base de datos del CREFT V. 0.2., y junto con otras variables no analizadas en este artículo, como el índice de área foliar (*IAF*), arquitectura de la planta, volumen de árboles, distribución y pérdida de biomasa, son la base para las predicciones que arroja el modelo. Adicionalmente, los resultados de esta investigación contribuirán a la alimentación de parámetros fisiológicos que podrán ser incluidos en planes de establecimiento de estas especies al utilizar agricultura de precisión, la cual podría aumentar los beneficios económicos y reducir el impacto ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cada una de las especies estudiadas se realizaron evaluaciones entre los años 2009 y 2011, en su hábitat natural en los siguientes sitios: *Cordia alliodora* en la finca La Chinita en zona del proyecto Procuenca, ubicada en la vereda San Peregrino, perteneciente al municipio de Manizales departamento de Caldas, con latitud 5° 06' N y 75° 56' W. *Alnus acuminata* en el sector de Sabinas, municipio de Manizales, con latitud 5° 02' N y longitud 75° 25' W, a 2.485 m.s.n.m. *Pachira quinata* en predios comerciales de la Reforestadora Monterrey, en el municipio de Zambrano, departamento de Bolívar, con latitud N 09°43'03,6" y longitud W 74°51'13,5", a 5 m de altitud.

Se realizaron curvas diarias de fotosíntesis y respiración, mediante el equipo portátil de intercambio gaseoso, LCI - ADC BioScientific Ltd, el cual calcula los valores de g_s , C_i , T_L , RFA , E , entre otras variables. Para las mediciones se escogieron tres árboles por especie, con más de 3 años de edad, cada hora se escogieron aleatoriamente tres hojas maduras de la parte media de cada árbol donde se registraron cinco datos por hoja (45 datos por especie). Las mediciones se realizaron entre las 4:30 a.m. y las 9:00 p.m., durante 3 días consecutivos.

Para calcular el déficit de presión de vapor de agua (*DPV*) se utilizó la Ecuación <<1>>

$$DPV = e_s - e_a \quad \langle\langle 1 \rangle\rangle$$

Donde:

e_a = Presión de vapor actual (mb)

e_s = Presión de vapor a saturación (mb), que se calcula como se indica en la Ecuación <<2>>

$$e_s = 6,1403 + 0,4057t + 0,0196t^2 + 0,00002t^3 + 0,000007xt^4 \quad \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

Donde:

t = Temperatura media del aire (°C)

Análisis de las variables. Se calcularon los parámetros de Am , RFA y ε , ajustando los datos de asimilación de CO_2 y RFA mediante el modelo por descrito en la Ecuación <<3>> (13).

$$A = (Am + Rd) \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon RFA}{Am + Rd}} \right) - Rd \quad \langle\langle 3 \rangle\rangle$$

Donde:

A : Asimilación neta de CO_2 en hojas individuales ($\mu\text{mol}(CO_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Am : Asimilación máxima de CO_2 como la asíntota de la regresión que describe la relación entre la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y la asimilación instantánea de CO_2 en hojas individuales ($\mu\text{mol}(CO_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Rd : Respiración oscura ($\mu\text{mol}(CO_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

ε : Rendimiento cuántico de la hoja (aceleración de la fase inicial de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO_2 en hojas individuales)

Las demás relaciones empíricas de dos variables se hicieron ajustando modelos no lineales con el algoritmo de Levenberg-

Marquardt (18), utilizando Sigmaplot 10. Los modelos ajustados se muestran en la Tabla 1.

Se asoció la asimilación con las variables temperatura de la hoja (T_L) y radiación fotosintéticamente activa (RFA), y la asimilación con el DPV y la RFA . En cada caso se utilizaron relaciones empíricas tridimensionales, las cuales se modelaron a través del ajuste de paraboloides, según la Ecuación <<4>>:

$$f = y_0 + ax + by + cx^2 + dy^2 \quad \ll 4 \gg$$

Para obtener los máximos se igualaron las derivadas parciales a cero, como lo indica la Ecuación << 5>>, calculando los puntos críticos y después se reemplazaron en la función original.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= a + 2cx = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} &= b + 2dy = 0 \end{aligned} \quad \ll 5 \gg$$

En el caso de *A. acuminata* la relación entre la asimilación, la RFA y T_L se ajustó mediante el modelo gaussiano bivariado (Ecuación <<6>>).

$$f = ae \left[-0,5 \left(\frac{x-x_0}{b} \right)^2 - 0,5 \left(\frac{y-y_0}{c} \right)^2 \right] \quad \ll 6 \gg$$

Donde

A : Asimilación máxima

X_0 : Temperatura óptima

Y_0 : Radiación óptima

La significancia de los parámetros de los modelos se evaluó al 1%.

Para calcular la fotosíntesis del dosel completo de la planta a partir de la

obtención de la asimilación máxima en hojas individuales, el modelo CREFT aplica la ecuación propuesta por Goudriaan (13), la cual relaciona algunos parámetros generados en mediciones de hojas individuales con el IAF , la RFA y el coeficiente de extinción de la luz, k (Ecuación <<7>>), para obtener una estimación aproximada del valor de la asimilación instantánea de CO_2 en la planta completa.

$$A_p = \frac{Am}{k} \ln \left(\frac{Am + \epsilon k RFA}{Am + \epsilon k RFA e^{-kIAF}} \right) AFT \quad \ll 7 \gg$$

Donde:

A_p : Asimilación instantánea de CO_2 en la planta completa ($\mu\text{mol}(CO_2) \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Am : Asimilación máxima como la asíntota de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO_2 en hojas individuales ($\mu\text{mol}(CO_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

ϵ : Rendimiento cuántico de la hoja como la aceleración de la fase inicial de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO_2 en hojas individuales ($\mu\text{mol}(CO_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

k : Coeficiente de extinción de la luz

IAF : Índice de área foliar (parámetro que ingresa al modelo en función del tiempo térmico)

AFT : Área foliar total (m^2)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la asimilación de CO_2 , la respiración y la transpiración a través del día. En las tres especies forestales la asimilación aumentó desde las primeras horas de la mañana, presentando los máximos valores alrededor de las 11:00 am para *C. alliodora* y *P. quinata* y a las 9:00 am para *A. acuminata*, con asimilaciones en las tres especies entre 17 y 25 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Figura 1).

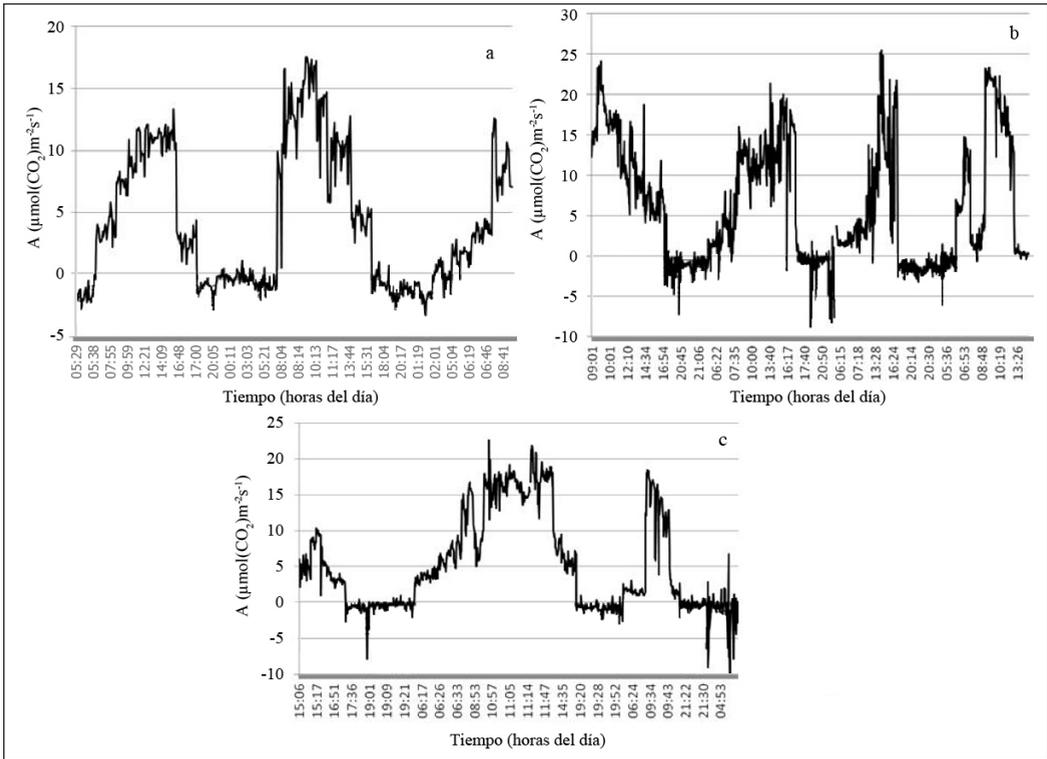


Figura 1. Comportamiento diario de la fotosíntesis en a. *C. alliodora*; b. *A. acuminata*; c. *P. quinata*.

El hecho por el cual la fotosíntesis en hojas bien expuestas a la luz aumenta desde las primeras horas de la mañana hasta alcanzar un máximo y disminuir posteriormente durante el resto del día o recuperarse parcialmente avanzada la tarde, es el resultado de un efecto complejo de la interacción de muchos factores internos y externos (28). Este fenómeno es común en plantas superiores y es un efecto principalmente del cierre estomático que causa el *DPV* (5). En un estudio en Islas Canarias en la especie forestal *Persea indica*, se demostró que en días con alto *DPV* se reflejaban dos valores pico de *A*, uno al final de la mañana y otro en la tarde con depresión al medio día (11). Otro factor físico influyente es la exposición de la planta a intensidades lumínicas y a temperaturas

superiores a las de saturación (3). Por otro lado, los factores bioquímicos también podrían ser responsables en la disminución de la tasa fotosintética del medio día. Una disminución en la eficiencia, expresada en el parámetro de fluorescencia de la clorofila *Fv/Fm*, fue paralela a la depresión del mediodía de *A* y *gs* (4).

La transpiración en las tres especies se incrementó a medida que avanzaba el día, alcanzando valores máximos alrededor del mediodía y decreció totalmente alrededor de las 5:00 pm (Figura 2). Este comportamiento puede explicarse ya que el proceso de transpiración es también conducido y regulado por los estomas. Dentro de la hoja, el agua que se encuentra rodeando las células del

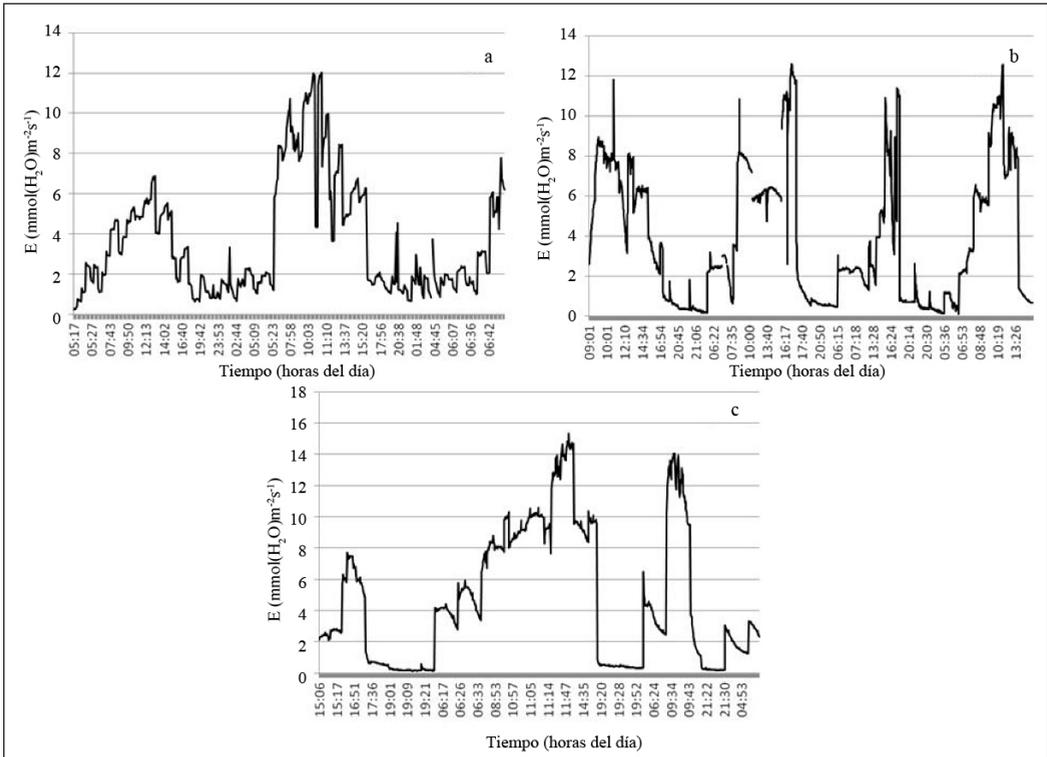


Figura 2. Comportamiento diario de la transpiración en **a.** *C. alliodora*; **b.** *A. acuminata*; **c.** *P. quinata*.

mesófilo se evapora y difunde hacia los espacios intercelulares que existen en el parénquima. Si los estomas están abiertos, la diferencia de presión de vapor provoca la pérdida de vapor de agua hacia la atmósfera. Las moléculas de CO_2 siguen esta misma ruta pero con una dirección contraria, marcando la condición de simultaneidad del proceso de fotosíntesis y transpiración (21).

Relación entre la fotosíntesis y la radiación fotosintéticamente activa. En las tres especies la relación entre la asimilación de CO_2 y la *RFA* está dada por un modelo exponencial asintótico, en el cual la máxima asimilación se alcanza siguiendo un comportamiento logarítmico (Figura 3) el cual implica que en la medida que la *RFA* es superior al

punto de compensación de luz, la tasa de fotosíntesis se va haciendo menor hasta llegar al nivel máximo (*Am*), a partir del cual hay saturación lumínica y la fotosíntesis se estabiliza. En el caso de *C. alliodora* la *Am* tuvo un valor de $14,0 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, este mismo valor lo encontraron López *et al.* (16) al evaluar las características fotosintéticas en esta especie. El valor de *RFA* en el que la fotosíntesis neta es máxima se denomina punto de saturación de luz. Los valores de radiación de saturación (valor de la *RFA* requerido para alcanzar el 99% de la asimilación máxima), de la asimilación para cada especie se presentan en la Tabla 2 y corresponden a 586, 1.108 y $813 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para *C. alliodora*, *A. acuminata* y *P. quinata*, respectivamente.

Después del punto de asimilación máxima no hay aumento en la fotosíntesis por más que aumente la *RFA*.

Existe entonces una rápida respuesta a la luz o una mayor eficiencia en la utilización de la radiación por los cloroplastos con bajos niveles de *RFA*; esta tasa de cambio en la fase inicial equivale al rendimiento cuántico (ϵ), con valores de 0,08 para *C. alliodora* y 0,05 para las otras dos especies. Quiere decir por ejemplo, para el caso de *A. acuminata* que, por cada μmol de fotones la especie asimila $0,05 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. En un estudio para determinar diferencias en las tasas de asimilación de tres especies (*P. fortunei*, *A. acuminata* y *G. robusta*) en Kenia, se encontró para *A. acuminata* una eficiencia cuántica de 0,031 (19).

Relación entre la fotosíntesis y la conductancia estomática. En *C. alliodora* la relación entre la asimilación y la conductancia estomática está descrita por un modelo exponencial asintótico (Figura 3b) en el que inicialmente se nota una rápida respuesta de la fotosíntesis al aumentar g_s , luego esta reacción se hace más lenta hasta alcanzar un máximo valor de asimilación de $21,89 \mu\text{moles de CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a $1 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (conductancia de saturación), a partir del cual no hay respuesta al incremento de g_s .

En *A. acuminata* esta misma respuesta frente a la conductancia está dada por una relación lineal con platoó (Figura 3d). Ésta se caracteriza porque la asíntota se alcanza en un punto de discontinuidad (conductancia de saturación alcanzada a los $0,655639 \text{ moles de H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) a partir del cual no aumenta la asimilación. La tasa de incremento lineal equivale a $3,9 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ por cada décima parte de una $\text{mol de H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ que aumente la conductancia estomática.

En *P. quinata* se observó una relación lineal para el rango de datos tomados durante los 3 días de medición. La pendiente de la línea recta que asocia estas dos variables fue de 0,9 lo cual significa que para el rango de datos analizados la asimilación aumenta $0,9 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ por $1 \text{ mol}(\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ que aumente la conductancia estomática.

Smart y Robinson (25) resumen el efecto de las condiciones ambientales en el comportamiento estomático, en que los estomas se abren y se cierran como respuesta a la radiación. El aumento que se produce en las primeras horas de la mañana se debe principalmente a la luz (17). A medida que avanza el día la planta transpira, y cuando es incapaz de traslocar el agua suficiente desde las raíces para satisfacer las tasas de transpiración, cerrará parcial o totalmente los estomas. Avanzada la tarde, si las condiciones ambientales vuelven a ser propicias, la planta abrirá de nuevo los estomas. Pero en cualquier caso, al atardecer como consecuencia de la caída de la luz, éstos se cerrarán y permanecerán así durante toda la noche.

El flujo de agua a través de la planta responde entonces a dos ambientes distintos. Por un lado, el ambiente aéreo a que está expuesta la hoja y que puede ser definido en términos de radiación, temperatura, diferencia de presión de vapor, contenido de CO_2 y condición de la capa límite. Por otro lado, las raíces comúnmente generan señales de estrés hídrico, las que sumadas a las señales en la conductividad hidráulica del xilema también controlan la pérdida de agua por la hoja (26).

Respuesta de la fotosíntesis a la relación E/DPV. En las tres especies forestales la respuesta de la asimilación frente a la relación de la transpiración con el déficit de presión de vapor de agua está

explicada por el modelo lineal con platoó (Figura 4 a, c y e). En su fase inicial la asimilación se incrementa linealmente a medida que el cociente de esta relación es mayor, alcanzando su máxima asíntota a los 0,53; 0,81 y 0,61 moles de H₂O de transpiración por cada milibar de DPV para *C. alliodora*, *A. acuminata* y *P. quinata*, respectivamente. En otras palabras, la asimilación se incrementa en 34,58; 31,56 y 22,15 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ por cada unidad de la relación E/DPV para cada especie, respectivamente.

Relación entre la asimilación y la concentración de CO₂ intercelular. En las tres especies la relación entre la asimilación de CO₂ y C_i está dada por un modelo exponencial decreciente (Figura 4 b, d y f), en el cual a medida que la concentración intercelular de CO₂ se incrementa, la asimilación se hace menor hasta el punto en el que se detiene la fotosíntesis. En muchas especies de plantas la apertura de estomas es inversamente proporcional a la concentración de CO₂ interno, tanto en condiciones de luz y oscuridad, el incremento de CO₂ a nivel intercelular causa el cierre, mientras que su disminución induce la apertura de los estomas, permitiendo la asimilación de carbono por la planta (24). Sin embargo, los estomas responden al CO₂ tanto en la luz como en la oscuridad, lo cual deja claro que la respuesta no depende únicamente de la fotosíntesis.

Relación entre la conductancia estomática y el déficit de presión de vapor. La respuesta de la conductancia estomática al déficit de presión de vapor de agua es exponencial decreciente; en las Figura 5 a, c y e se observa que a medida que el DPV se incrementa para las tres especies forestales, los valores de conductancia estomática se reducen, hasta que finalmente no hay respuesta.

Relación entre la transpiración y la conductancia estomática. En las especies *C. alliodora* y *A. acuminata* para el rango de datos observados, el comportamiento de la transpiración con respecto a la conductancia estomática está explicado por el modelo exponencial (Figura 5 b y d). A medida que aumenta la conductancia estomática también se incrementa la transpiración.

En *P. quinata* la relación entre estas dos variables presenta un modelo exponencial asíntótico. En esta especie se alcanza un valor máximo de transpiración de 11,67 milimoles de agua a una conductancia de saturación equivalente a 1,12 $\text{mol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, después de este valor de g_s , la transpiración no presenta respuesta positiva al incremento de la conductancia estomática (Figura 5f).

La importancia de relacionar estas dos variables radica en que a partir del conocimiento del valor de una, se podría conocer el valor de la otra, ya que a veces es dificultoso realizar mediciones directas en el campo de alguna de estas variables, especialmente de la transpiración.

En las relaciones tridimensionales (Figura 6) que se describen a continuación, se utilizó para la mayoría de los casos un paraboloides de acuerdo con la Ecuación <<8>>:

$$f = y_0 + ax_1 + bx_2 + cx_1^2 + dx_2^2 \quad \ll 8 \gg$$

Esto se hizo porque el comportamiento natural de la asimilación con respecto a las otras variables no es estrictamente creciente o decreciente, lo normal es que exista un punto óptimo, en este caso una combinación de x_1 y x_2 , en la cual la asimilación (f) es máxima. Por fuera de estos valores la asimilación es menor.

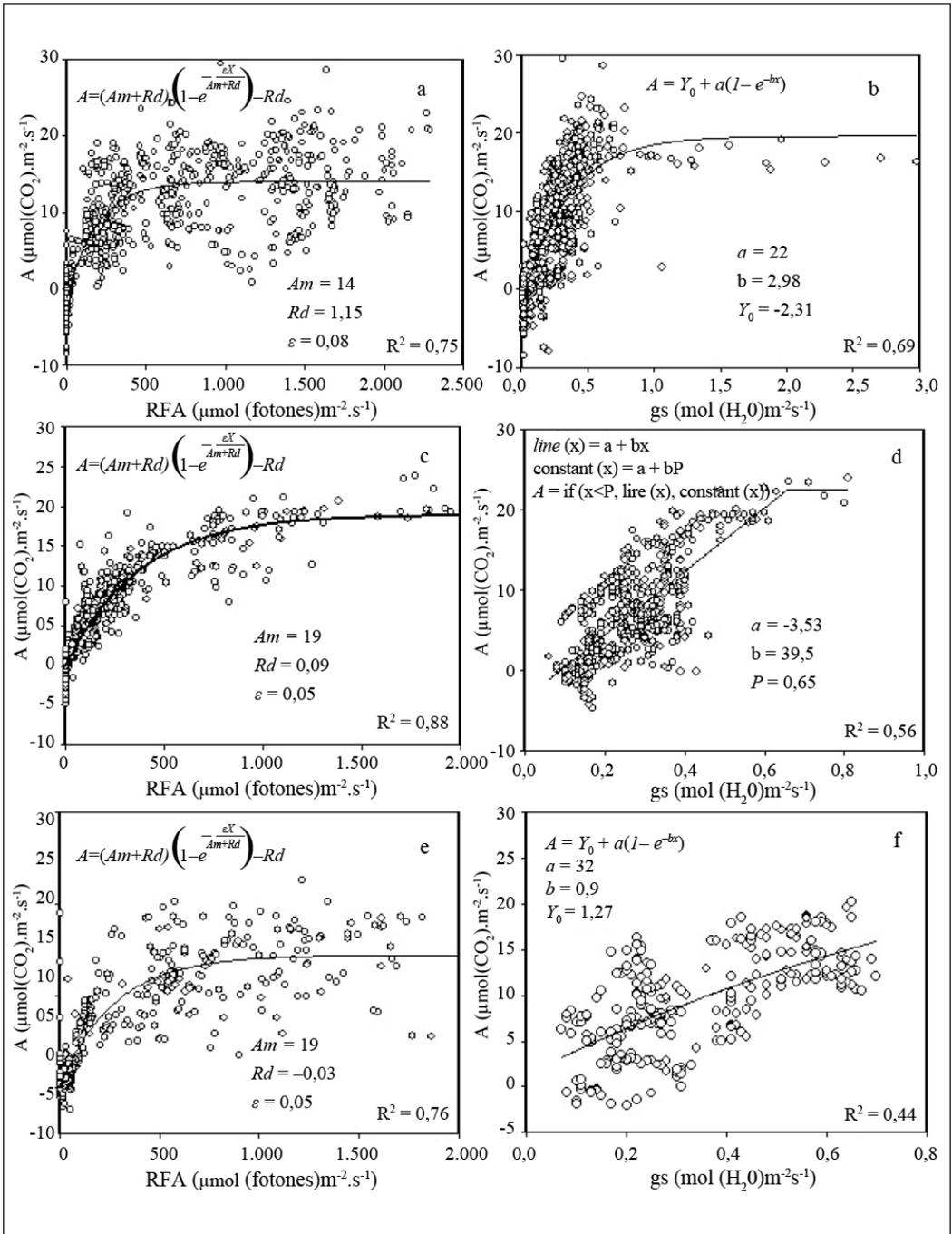


Figura 3. Respuesta de la asimilación a la radiación fotosintéticamente activa y a la conductancia estomática en las especies *C. alliodora* (ab), *A. acuminata* (cd) y *P. quinata* (ef).

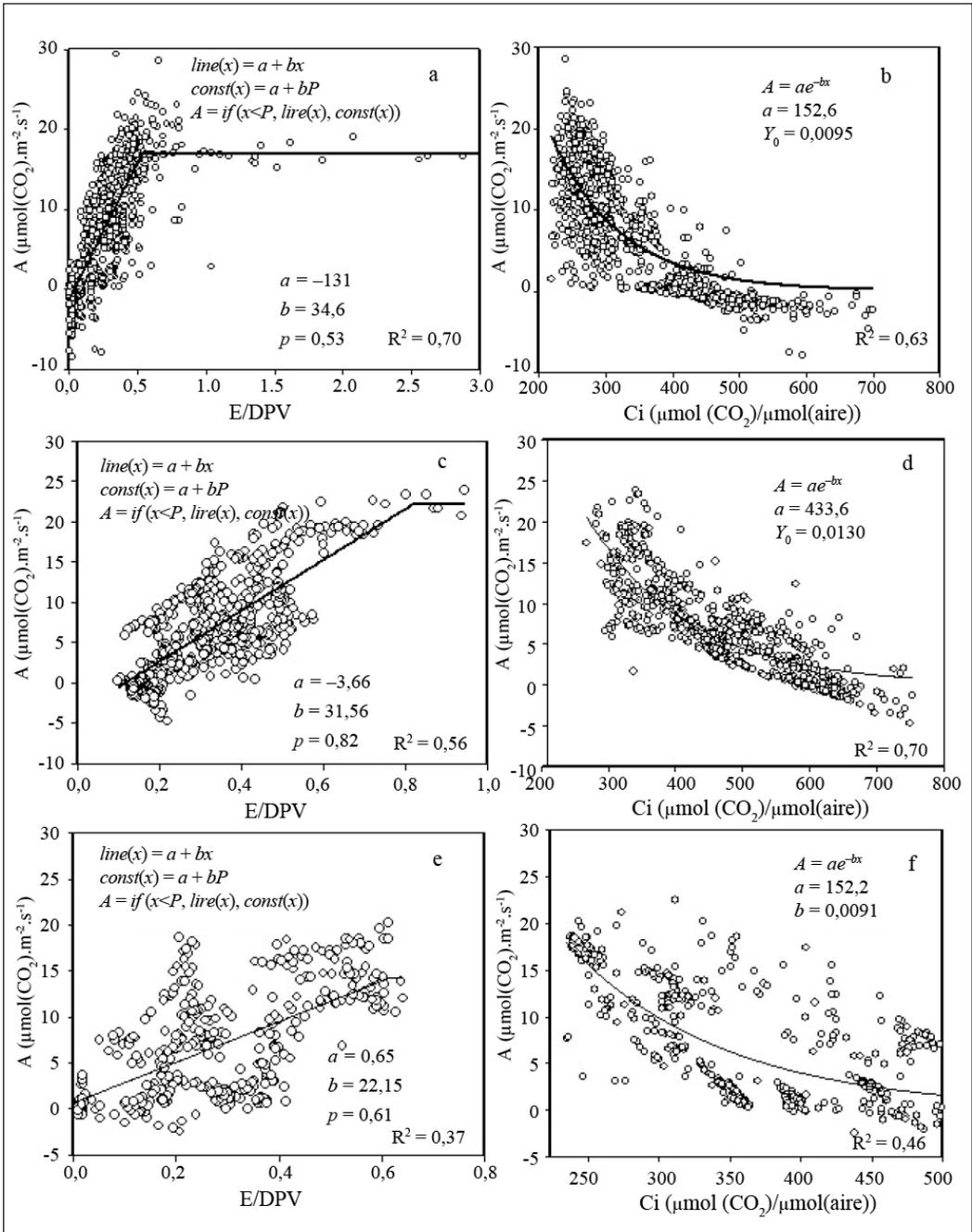


Figura 4. Comportamiento de la asimilación frente a la relación de la transpiración (E) y el Déficit de Presión de Vapor (DPV), y respuesta de la asimilación a la concentración intercelular de CO_2 para las especies *C. alliodora* (ab), *A. acuminata* (cd) y *P. quinata* (ef).

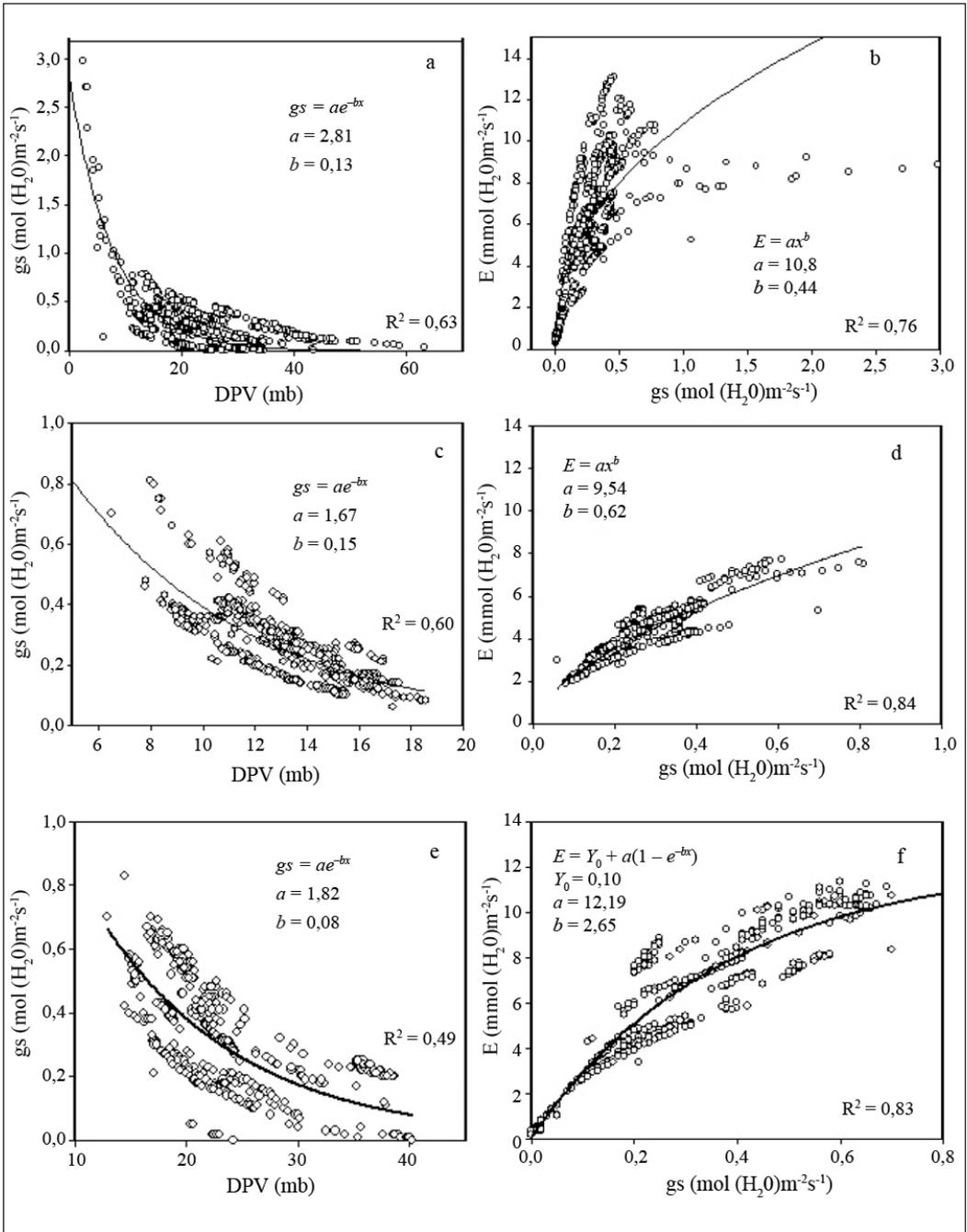


Figura 5. Comportamiento de la conductancia estomática (g_s) con relación al déficit de presión de vapor (DPV) y la transpiración (E) frente a la conductancia estomática para las especies *C. alliodora* (ab), *A. acuminata* (cd) y *P. quinata* (ef).

El parámetro y_0 es una constante que representa la asimilación cuando las variables x_1 y x_2 son iguales a cero. El parámetro "a" representa el crecimiento o decrecimiento lineal de la asimilación con respecto a x_1 . El parámetro "c" representa el comportamiento parabólico de la asimilación con respecto a x_1 . Igualmente, b representa el crecimiento o decrecimiento lineal de la asimilación con respecto a x_2 y "d" representa el comportamiento parabólico de la asimilación con respecto a x_2 .

Si "c" o "d" son estadísticamente diferentes de cero (y más concretamente negativos) implica que la asimilación tiene un comportamiento parabólico con su

respectivo máximo. En este caso "a" y "b" no se interpretan. En caso contrario significa que no existe comportamiento parabólico y se debe mirar si "a" y "b" son diferentes de cero. Si lo son, quiere decir que la asimilación solamente crece (a y b positivos) o solamente decrece (a y b negativos) en el rango observado de x_1 o x_2 . Si estadísticamente alguno de estos parámetros no es diferente de cero, quiere decir que en el rango observado la asimilación no varía significativamente.

Relación entre la fotosíntesis, T_L y la RFA. En *C. alliodora*, el análisis del paraboloides ajustado muestra que los coeficientes de los términos cuadráticos "c" y "d" son negativos

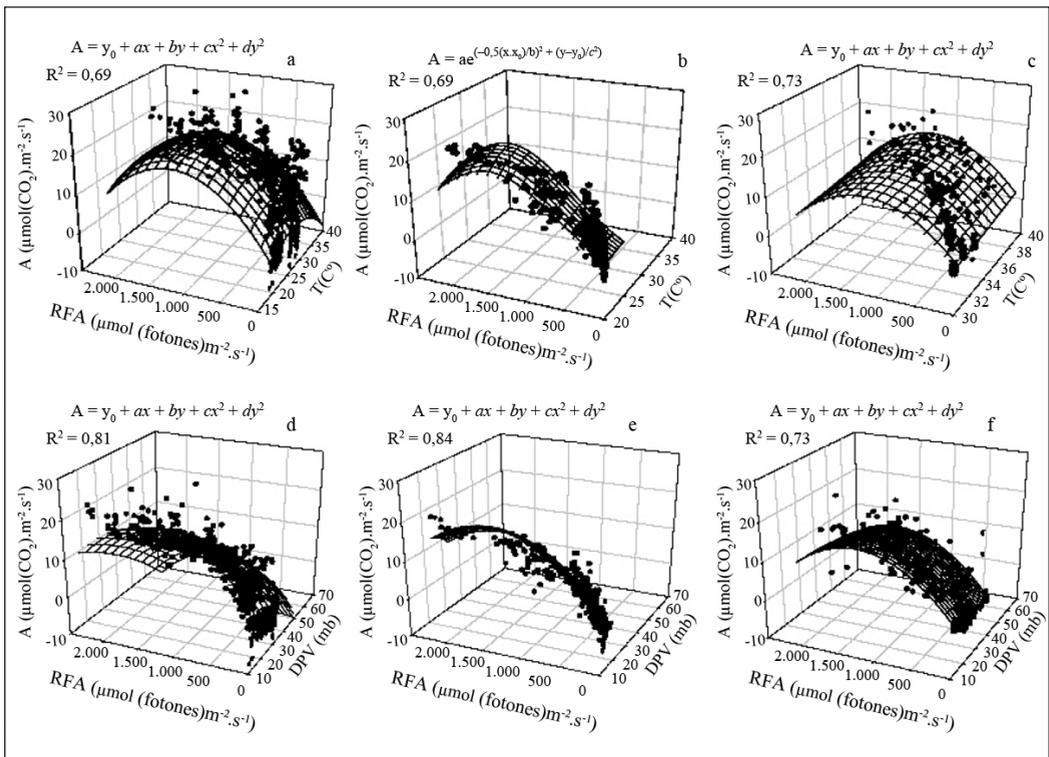


Figura 6. Comportamiento de la asimilación en respuesta a la temperatura (T) y la RFA, y la asimilación en respuesta del DPV y la RFA, para las especies *C. alliodora* (ad), *A. acuminata* (be) y *P. quinata* (cf).

y estadísticamente diferentes de cero (Tabla 1), lo que determina la existencia de una asimilación máxima de $20,41 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ alcanzada a una temperatura de $26,5^\circ\text{C}$ y a una radiación de $1.350 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Figura 6a).

En *A. acuminata* el modelo gaussiano bivariado (Figura 6b) determina una máxima asimilación de $24,13 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ la cual se alcanza a una temperatura de $25,54^\circ\text{C}$ y a una RFA de $1.454,6 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

En el caso de *P. quinata* el término cuadrático para la RFA es negativo y estadísticamente diferente de cero, y para T_L es positivo pero no es posible afirmar que es diferente de cero ($p = 0,4893$). Igualmente, no es posible afirmar que el coeficiente lineal de la temperatura es diferente de cero ($p=0,6576$), por lo tanto para el rango de datos observados, la asimilación crece a medida que aumenta la radiación, alcanzando un punto máximo ($13,0 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) a una radiación de $1.192 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a partir del cual la asimilación decrece. En el caso de la respuesta a la temperatura, al no ser estadísticamente significativa, no es posible llegar a una conclusión del comportamiento de la asimilación con respecto a la temperatura, al relacionar las tres variables (*A*, T_L y *RFA*).

Relación de la asimilación con el DPV y la RFA. En *C. alliodora* y *A. acuminata* los coeficientes de los términos cuadráticos son negativos y estadísticamente diferentes de cero ($P < 0,0001$), por lo tanto, la asimilación tiene un comportamiento parabólico con respecto al déficit de presión de vapor y la *RFA* (Figura 6 d y e).

En *C. alliodora*, para el rango de datos observados, la asimilación decrece en la medida que aumenta el *DPV* y alcanza un

valor máximo de $26,89 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ con un valor de *DPV* de $-32,67\text{mb}$ y una radiación de $1.320 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. El valor negativo indica que para los datos analizados la asimilación es máxima cuando *DPV* es cero, lo que fisiológicamente implica que el ambiente se encuentre saturado de humedad.

En *A. acuminata* el máximo de asimilación es $22,24 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y se alcanza a los $8,21\text{mb}$ de *DPV* y una *RFA* de $1.418 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a partir de estos valores, la asimilación decrece.

En el caso de *P. quinata* el término cuadrático para la *RFA* es negativo y estadísticamente diferente de cero ($P < 0,0001$) y el del *DPV* es positivo y no es estadísticamente significativo ($P=0,5156$) al igual que el coeficiente lineal ($p=0,7777$); por lo tanto, la asimilación se incrementa hasta un máximo de $16,55 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ cuando la radiación llega a $1.276 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Con respecto al *DPV*, para el rango de datos observados, no es posible establecer una relación entre estas dos variables.

Finalmente se concluye que:

- Los valores de asimilación máxima de CO_2 para las especies *C. alliodora* y *P. quinata* fueron de $14 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, diferentes al de *A. acuminata*, la cual fue de $18 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- Las tasas de fotosíntesis a lo largo del día mostraron, en general, una tendencia unimodal. Sin embargo, los valores son muy fluctuantes entre una hora y otra, debido principalmente a las condiciones cambiantes de nubosidad.
- La relación entre la asimilación de CO_2 y la conductancia estomática estuvo explicada

Tabla 1. Modelos y parámetros de las relaciones entre la fotosíntesis, conductancia estomática, radiación fotosintéticamente activa, temperatura, concentración intercelular de CO₂, déficit de presión de vapor y transpiración para las especies forestales evaluadas.

Especie	Rta	Exp	Modelo	X ₀	Y ₀	a	b	c	d	P	Y	X	p-valor	R ²	
<i>A. alliodora</i>	A	gs	$f=y_0+a*(1-\exp(-b*x))$	-2,3100	21,89	2,9763							<0,0001	0,69	
	A	Ci	$f = a * \exp(-b*x)$	152,57	0,0095								<0,0001	0,63	
	gs	DPV	$f = a * \exp(-b*x)$	2,8168	0,1286								<0,0001	0,63	
	A	REA vs T	$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$	-35,9773	2,8281	0,0280	-0,0534	-1,0345E-005				1350	26,48	<0,0001	0,69
	A	REA vs DPV	$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$	7,0514	-0,1895	0,0254	-0,0029	-9,6289E-006				1320	-32,67	<0,0001	0,81
	E	Gs	$f=a*x^b$	10,8469	0,4405									<0,0001	0,70
	A	E/VPD	$\text{line}(x)=a+b*x$ $\text{constant}(x)=a+b*P$ $f=\text{if}(x<P,\text{line}(x),\text{constant}(x))$	-1,3106	34,588					0,5282				<0,0001	0,70
	A	gs	$\text{line}(x)=a+b*x$ $\text{constant}(x)=a+b*P$ $f=\text{if}(x<P,\text{line}(x),\text{constant}(x))$	-3,5280	39,505					0,6556				<0,0001	0,56
	A	E/VPD	$\text{line}(x)=a+b*x$ $\text{constant}(x)=a+b*P$ $f=\text{if}(x<P,\text{line}(x),\text{constant}(x))$	-3,6620	31,561					0,8195				<0,0001	0,56
	A	Ci	$f = a * \exp(-b*x)$	433,67	0,0130									<0,0001	0,70
<i>A. acuminata</i>	gs	DPV	$f = a * \exp(-b*x)$	1,6776	0,1456								<0,0001	0,60	
	E	Gs	$f=a*x^b$	9,5359	0,6166								<0,0001	0,84	
	A	REA vs T	$f = a * \exp(-.5 * ((x-x_0)/b)^2 + (y-y_0)/c)^2$	1454,6	24,1379	8,9320	808,5054					1455	25,54	<0,0001	0,69
	A	REA vs DPV	$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$	25,54	0,3137	0,5252	0,0279	-0,0320	-9,8404E-006			1418	8,21	<0,0001	0,84
	A	gs	$f=y_0+a*(1-\exp(-b*x))$	1,2743	31,3761	0,8963							<0,0001	0,44	
	A	E/VPD	$\text{line}(x)=a+b*x$ $\text{constant}(x)=a+b*P$ $f=\text{if}(x<P,\text{line}(x),\text{constant}(x))$	0,6511	22,150					0,6124				<0,0001	0,37
	A	Ci	$f = a * \exp(-b*x)$	152,26	0,0091									<0,0001	0,46
	gs	DPV	$f = a * \exp(-b*x)$	1,8204	0,0782									<0,0001	0,49
	E	Gs	$f=y_0+a*(1-\exp(-b*x))$	0,1013	12,19	2,6515								<0,0001	0,83
	A	REA vs T	$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$	5,0304	-0,4458	0,0209	0,0110	-8,7642E-006				1192	20,26	<0,0001	0,73
A	REA vs DPV	$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$	1,5161	0,0512	0,0231	-0,0022	-9,0486E-006				1276	11,64	<0,0001	0,73	

Tabla 2. Modelos y parámetros de las relaciones entre la asimilación y la radiación fotosintéticamente activa de las tres especies forestales evaluadas.

Especie	Respuesta (F)	Explicativa (X)	Modelo	RFA de saturación al 95% de la asíntota	Am	Rd	ϵ	R ²	p-valor
<i>C. alliodora</i>	Asimilación	RFA	$f = (Am + Rd) \left(1 - e^{-\frac{\epsilon X}{Am + Rd}} \right) - Rd$	586	14,0233	1,1479	0,0795	0,7499	<0,0001
<i>A. acuminata</i>	Asimilación	RFA	$f = (Am + Rd) \left(1 - e^{-\frac{\epsilon X}{Am + Rd}} \right) - Rd$	1.108	18,9259	0,0931	0,0515	0,8810	<0,0001
<i>P. quinata</i>	Asimilación	RFA	$f = (Am + Rd) \left(1 - e^{-\frac{\epsilon X}{Am + Rd}} \right) - Rd$	813	14,4100	-0,0344	0,0529	0,7624	<0,0001

por modelos diferentes para cada una de las especies, lo cual sugiere la importancia de las mediciones *in situ* cuando se quieren determinar parámetros de comportamiento fisiológico de alguna especie.

- La significancia estadística (p-valor <0,0001) de los parámetros evaluados en la relación *A* versus *RFA*, permite tener valores asociados a niveles de probabilidad que pueden ser utilizados para alimentar el modelo CREFT V 2.0.
- Con el presente trabajo de investigación se aporta al conocimiento acerca de la actividad fotosintética de las tres especies evaluadas, lo cual es de gran importancia si se tiene en cuenta que los bosques tropicales componen una gran parte de la biomasa terrestre y estudios como éste son necesarios para cuantificar la dinámica del carbono a nivel regional y mundial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR, al Centro Nacional de Investigaciones del Café-Cenicafé y a la Reforestadora Pizano S.A., por toda la colaboración en la toma de la información.

LITERATURA CITADA

1. BERMÚDEZ, J.C.; TANAKA, C.; OHTANI, T.; OKAI, R.; USUKI, H. El maquinado de nogal (*Cordia alliodora*) crecido en Colombia. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.unicauca.edu.co/biotecnologia/ediciones/vol4/11.pdf>. Consultado en el 2006
2. CENICAFÉ. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana: El aliso o Cerezo. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 35 p.
3. D'AMBROSIO, N.; ARENA, C.; DE SANTO, A. Temperature response of photosynthesis, excitation

- energy dissipation and alternative electron sinks to carbon assimilation in *Beta vulgaris* L. *Environmental and experimental botany* 55:248–257. 2006.
4. DEMMIG, A.; III, W.W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual review of plant physiological plant molecular biology* 43:599–626. 1992
 5. FARQUHAR, G.D.; SHARKEY, T.D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual review plant physiology* 33:317–345. 1982.
 6. GIECC. Climate change: Contribution of WG I to the second assesment report of the IPCC. Cambridge : Cambridge university press, 1996.
 7. GIECC. Implicaciones de las propuestas de limitación de emisiones de CO₂: Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Ginebra [Suiza] : Organización meteorológica mundial : Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, 1997a. 51 p.
 8. GIECC. Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: Implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas: Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Ginebra [Suiza] : Organización meteorológica mundial : Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, 1997b. 63 p.
 9. GIECC. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura: Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Ginebra [Suiza] : Organización meteorológica mundial : Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, 2000a. 30 p.
 10. GIECC. Informe especial del IPCC escenarios de emisiones: Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Ginebra [Suiza] : Organización meteorológica mundial : Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, 2000b. 27 p.
 11. GONZÁLEZ, A.M.; MORALES, D.; JIMÉNEZ, M.S. Leaf gas exchange characteristics of a Canary laurel forest tree species [*Persea indica* (L.) K. Spreng.] under natural conditions. *Journal of plant physiology* 159:695–704. 2002.
 12. GOODESS, C.M.; PALUTIKOF, J.P. The development of regional climate scenarios and ecological impact of greenhouse gas warming. *Advances in ecology res.* 22:33-62. 1992.
 13. GOUDRIAAN, J. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis: Short communication. *Agricultural and forest Meteorology* 38(1/3):180–182. 1986.
 14. IPCC. Climate change: Impacts, adaptation, and vulnerability. Technical summary, a reporting of working group II of the intergovernmental panel of climate change, 2001.
 15. LAMBERS, H.; CHAPIN III, F.S.; PONS, T.L. Photosynthesis, respiration, and long-distance transport in plant physiological ecology. New York : Springer, 1998.
 16. LÓPEZ R., J.C.; RIAÑO H., N.M.; LÓPEZ F., Y. Características fotosintéticas de cinco especies forestales. *Cenicafé* 52(3):161-169. 2001.
 17. LOVEYS, B.R. Stomatal patchiness of field-grown Sultana leaves: Diurnal changes and light effects. *Vitis* 35:7-10. 1996.
 18. MARQUARDT, D.W. An algorithm for least squares estimation of parameters. *Journal of the society of industrial and applied mathematics* 11:431-441. 1963.
 19. MUTHURI, C.W.; ONG, C.K.; CRAIGON, K.; MATI, B.M.; NGUMI, V.W.; BLACK, C.R. Gas exchange and water use efficiency of trees and maize in agroforestry systems in semi-arid Kenya. *Agriculture, ecosystems and environment* 129:497–507. 2009.
 20. NASA. Research finds 2010 tied for warmest year on record. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/2010-warmest-year.html>. Consultado el 21 de Agosto de 2011.
 21. PEARCY, R.W.; SCHULZE, E.D.; ZIMMERMANN, R. Measurement of transpiration and leaf conductance. P.137-153. En: PEARCY, R.W.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H.A.; RUNDEL, P.W. *Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation*. New York : Chapman and Hall, 1989.
 22. RIAÑO, N.; TANGARIFE, G.; OSORIO, O.; GIRALDO, J.; OSPINA, C.; OBANDO, D.; GÓMEZ, L.; JARAMILLO, L. Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico. Chinchiná : Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural : Federación Nacional de Cafeteros : CENICAFÉ : CONIF, 2005. 51 p.

23. SARALABAY, V.C.; VIVEKANANDAN, M.; SURESH B., R. Plant responses to high CO₂ concentration in the atmosphere. *Photosynthetica* 33:7-35. 1997.
24. SQUEOL, F.A.; LEON, M.F. Transpiración en: *Fisiología vegetal*. La Serena : Universidad de La Serena, 2007.
25. SMART, R.; ROBINSON, M. Sunlight into wine: A handbook for winegrape canopy management. *Winetitles* : Adelaide, 1991.
26. SPERRY, J.S.; ADLER, F.R.; CAMPBELLO, G.S.; COMSTOCK, J.P. Limitation of plant water use by rhizosphere and xylema conductance: Resultados from model. *Plant, cell and enviroment* 21:347-359. 1998.
27. UNESA. Forestación y reforestación: Sumideros de carbono. En: RIVERO T., P.; LEÓN, G.; EICHHAMER, W.; DEPUTY, G.; MATEOS, J.L.; GONZÁLEZ S., J.M.; FERRANDO B., G.; CISNEROS G., P.; PÉREZ P., D. Metodologías para la implementación de los mecanismos flexibles de Kioto: Mecanismo de desarrollo limpio en Latinoamérica. Madrid : UNESA, 2005.
28. XU D., Q.; SHEN, Y.K. Midday depression of photosynthesis. p. 451-459. En: PESSARAKLI, M. *Handbook of photosynthesis*. New York : Marcel Dekker, 1996.
29. Ceiba Tolúa. [En línea]. Disponible en internet: http://elsemillero.net/nuevo/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=212. Consultado el 19 de Diciembre de 2012.

LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA A PARTIR DE DIFERENTES FUENTES FERTILIZANTES

Hernán González Osorio*, Siavosh Sadeghian Khalajabadi*

RESUMEN

GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN K., S. Lixiviación de nitrógeno en suelos de la zona cafetera a partir de diferentes fuentes fertilizantes. Revista Cenicafé 63 (1): 111-119. 2012

Con el objetivo de encontrar nuevas opciones que conduzcan a mejorar la eficiencia de la fertilización con nitrógeno (N) en el cultivo del café, durante 90 días en condiciones de laboratorio mediante la técnica de columnas de lixiviación, se evaluó la lixiviación de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$, en tres suelos de la zona cafetera colombiana, dos de ellos con predominio de carga variable. Los tratamientos evaluados fueron urea prilled (46%N), sulfato de amonio-SAM (21%N) y nitrato de amonio-NA (26%N). Del total de N aplicado, las pérdidas por lixiviación ante el exceso de humedad, correspondieron en más del 90% al $N-NH_4^+$, la magnitud fue diferente según el tipo de suelo y la fuente fertilizante aplicada. Para los suelos con predominio de carga variable, la lixiviación de $N-NH_4^+$ mantuvo la relación $SAM \geq NA > urea$, presentándose una rápida lixiviación en aquel de menor desarrollo estructural. Para el suelo con predominio de carga permanente, la lixiviación del catión fue inferior del 28%, registrándose una relación de pérdidas equivalente a $SAM=NA > urea$. En cuanto al $N-NO_3^-$ lixiviado, los niveles fueron mayores en el tratamiento con urea. La lixiviación de $N-NH_4^+$ y $N-NO_3^-$ estuvo asociada con la carga variable inducida por los cambios del pH efecto de las fuentes fertilizantes y con el exceso de humedad que pudo haber impedido temporalmente los procesos bioquímicos de transformación de N en el suelo.

Palabras clave: Suelos con carga variable, movimiento de iones, nitrato, amonio.

ABSTRACT

In order to find new options that lead to an improvement in the efficiency of fertilization with nitrogen (N) in coffee cultivation, the column leaching technique, leaching of $N-NO_3^-$ and $N-NH_4^+$ was evaluated in three soils of the Colombian coffee zone, two of them with varying load predominance, for 90 days under laboratory conditions. The treatments were prilled urea (46 % N), ammonium sulfate -SAM (21% N) and ammonium nitrate -NA (26% N). Regarding the total of N applied, more than 90% of leaching losses due to moisture excess corresponded to $N-NH_4^+$, the magnitude was different depending on the type of soil and the applied fertilizer source. For soils with varying load predominance, the leaching of $N-NH_4^+$ maintained a ratio $SAM \geq NA > urea$ with rapid leaching at the one with the lowest structural development. For the soil with permanent charge predominance, the cation leaching was below 28 %, with a ratio loss equivalent to $SAM=NA > urea$. Regarding the $N-NO_3^-$ leach, the levels were higher in the treatment with urea. The leaching of $N-NH_4^+$ and $N-NO_3^-$ were associated with the variable load induced by pH changes, fertilizer sources effect and moisture excess that may have temporarily prevented the biochemical processes of N transformation in the soil.

Keywords: Soils with variable load, ions movement, nitrate, ammonium.

* Investigador Científico I, e Investigador Científico II, respectivamente, Disciplina de Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El nitrógeno (N) es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, razón por la cual requiere ser incluido en los programas de fertilización en diversos cultivos. El café no es la excepción, dado que necesita alrededor de 500 kg.ha⁻¹ del elemento para garantizar un adecuado crecimiento vegetativo (14) y entre 240 y 300 kg.ha⁻¹-año⁻¹ para la fase de producción (13).

El N suministrado a través de la fertilización, experimenta transformaciones a corto, mediano y largo plazo, de acuerdo a unas condiciones químicas, físicas y de disponibilidad hídrica específicas de los suelos (4, 6, 11). Conforme se dan estos cambios, la solución del suelo se abastece del nutrimento, y desde allí, una porción pasa a conformar parte integral de los tejidos vegetales, otra es retenida por el componente biológico del suelo, adsorbida o fijada por la fase sólida del mismo, mientras que otro porcentaje se moviliza hacia horizontes sub superficiales por el fenómeno de la lixiviación (12); siendo este último un aspecto de particular atención en diversas áreas agrícolas del mundo, por el impacto que tiene en la reducción del rendimiento de las cosechas y en la contaminación de las fuentes de agua (9, 11).

Por lo anterior, en el ámbito científico y comercial se vienen proponiendo opciones conducentes a incrementar la eficiencia en el uso del N. En este sentido, pueden ser útiles los fertilizantes cuyos recubrimientos retardan o inhiben la reacción de sus componentes (15, 17), así como la implementación de esquemas de abonamiento ajustados a las características edáficas, climáticas y de cultivo.

Dada la importancia del N para el café y la necesidad de encontrar nuevas opciones que mejoren la efectividad en su aplicación, en el presente estudio se evaluaron las

pérdidas de N por lixiviación, a partir del suministro de fertilizantes nitrogenados de uso común en la caficultura de Colombia, en tres suelos diferentes en sus características químicas, físicas y mineralógicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En cada una de las unidades cartográficas de suelos Chinchiná, Doscientos y Quindío, de la zona cafetera de Colombia, se seleccionó un lote con un mínimo de 10 años sembrado con café. Allí, se tomaron sub muestras de 5 kg de suelo, en los primeros 30 cm del horizonte A, hasta completar 60 kg. La taxonomía y las características mineralógicas y químicas de los suelos seleccionados se presentan en la Tabla 1.

El suelo correspondiente a cada localidad se llevó al laboratorio de la Disciplina Suelos de Cenicafé, donde se disgregó (rompimiento de terrones grandes) y homogeneizó. Posteriormente, se tamizó con mallas de 1 y 4 mm de abertura, con el fin de seleccionar aquella porción de suelo de un tamaño intermedio entre las aberturas citadas.

La muestra de cada localidad se empacó en 24 columnas de PVC, de 5,5 cm de diámetro, hasta alcanzar 20 cm de longitud, una vez preparadas, se colocaron en una superficie nivelada y se humedecieron por capilaridad, con agua desionizada hasta capacidad de campo. Después de 5 días, en la parte superior de las columnas se aplicaron los tratamientos, bajo el diseño completamente aleatorio, consistentes en el suministro de 1 g de N, mediante el uso de urea (46% de N), sulfato de amonio-SAM- (21% de N) y nitrato de amonio -NA-(26% de N) como fuentes fertilizantes. Además, se contó con un testigo al cual no se le adicionó fertilizante alguno. Se tuvieron

Tabla 1. Clasificación taxonómica, mineralogía y características químicas de los suelos objeto de estudio.

	Unidad Chinchiná <i>Pachic Fulvudand</i>	Unidad Quindío <i>Typic Udivitrand</i>	Unidad Doscientos <i>Lytic Dystrudept</i>
Feldespatos (%)	30-50	30-50	15-30
Vidrio volcánico (%)	Trazas	Trazas	Trazas
Hornblenda (%)	15-30	15-30	30-50
Cuarzo (%)	<15	<15	<15
No cristalinos (%)	>50	30-50	30-50
Metahaloista (%)	No detectado	5-15	15-30
Circón	5-15	Trazas	Trazas
pH	5,1	5,8	5,1
Materia orgánica (%)	13,4	4,4	17,1
P (mg.kg ⁻¹)	20	9,0	3,5
K (cmol _c .kg ⁻¹)	0,16	0,18	0,4
Ca (cmol _c .kg ⁻¹)	1,33	1,5	1,6
Mg (cmol _c .kg ⁻¹)	0,47	0,2	0,4

seis unidades experimentales, asignadas a cada tratamiento, de acuerdo con el diseño experimental completamente aleatorio.

A partir de este momento, cada 10 días, durante los 3 meses siguientes, las unidades experimentales se humedecieron con agua desionizada hasta capacidad de campo, más 50 mL de exceso (riego). En las mismas fechas en las que se efectuó el riego, se colectó el efluente en la parte inferior de cada unidad experimental (agua lixiviada) y se determinó la concentración de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ por destilación, y el pH de la misma por el método potenciométrico.

Luego de 90 días, se retiraron las columnas y se midió el pH en agua y en KCl 1M, a dos profundidades: 0-10 cm y 10-20cm. Los resultados del pH en agua y en KCl 1M, permitieron establecer el delta de pH.

Los resultados se analizaron bajo el diseño experimental propuesto y se efectuaron comparaciones entre los tratamientos a través de la Prueba Tukey al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un amplio sentido, la magnitud de las pérdidas por lixiviación ante un exceso de humedad, fue diferente según la naturaleza del suelo y de la fuente fertilizante aplicada.

Unidad Quindío. La concentración de NH₄⁺ en la solución lixiviada superó en más de 90 veces a la del NO₃⁻, durante todas las evaluaciones. Dicho fenómeno que se evidenció a partir del primer riego, no permitió detectar NH₄⁺ proveniente del NA y del SAM, del orden del 4% y el 11%, respectivamente (Figura 1).

Con relación al acumulado de pérdidas de N, se alcanzó un 58% con el SAM y 34% con NA, mientras que con la urea y el testigo, fueron máximo 2,9%.

Los altos niveles de amonio en el lixiviado o efluente pueden relacionarse con tres fenómenos. En primera instancia, con la composición química del NA y del SAM, las cuales son portadoras de N en forma

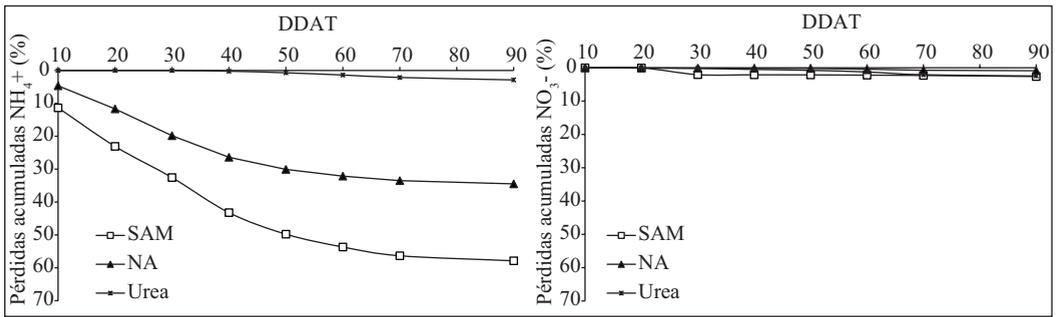


Figura 1. Pérdidas de N- NH_4^+ y N- NO_3^- por lixiviación, en suelo de la unidad Quindío. DDAT: Días después de la aplicación del tratamiento.

de amonio en diferente concentración; en segunda medida, es posible que la cantidad del fertilizante ubicado en las columnas hubiese sido relativamente alto como para reflejarse en el agua de percolación; por último, no se desestima que ante un exceso de humedad al que fueron sometidas las unidades experimentales, se indujera a interferir con la acción de los microorganismos encargados de la nitrificación del amonio.

Respecto al tratamiento con urea, la baja concentración en el agua lixiviada, puede estar asociada con lo discutido anteriormente, por ser ésta una molécula dependiente del componente biológico para su transformación y por el agotamiento del elemento por volatilización, que pudo haberse presentado durante las primeras horas luego de su aplicación (3). Cabe anotar, que el hecho de que el amonio y el nitrato estuvieran prácticamente ausentes del efluente, no se traduce en que el elemento suministrado a partir de la urea se pierda poco por lixiviación. Esto significa que la urea como molécula puede también migrar y conducir el N al agua de percolación sin necesidad de que el elemento pase a las formas evaluadas en este estudio.

Por lo mencionado, no se descarta que el fenómeno descrito se manifieste también

en condiciones de campo, particularmente durante periodos La Niña.

Para el caso específico de la lixiviación de NO_3^- , entre los días 40 y 70, aunque se detectaron los mayores valores, éstos fueron muy bajos con relación a los del amonio. En este sentido, con el SAM los tenores oscilaron entre 2,1% y 2,3%, alrededor de 0,4% con NA y 1,2% en el testigo, este último proveniente de los fenómenos asociados con la mineralización de la materia orgánica. En presencia de urea, los niveles se mantuvieron casi proporcionales a los de amonio.

El NO_3^- en el tratamiento con SAM, fertilizante que carece de N en forma nítrica, y para el testigo sin fertilizante, demuestra que la conductividad hidráulica de este suelo, alcanza a ser 70% superior a la de la unidad Chinchiná (1), asociada con el débil desarrollo estructural que caracterizaron sus "peds" en condiciones de campo, facilitarían también el flujo de oxígeno para una oxidación de N en todas las unidades experimentales.

Si bien las aplicaciones de las fuentes fertilizantes suscitaron diferente concentración de N en solución, pudo constatar que no todo el N contenido en ellas se lixivió, lo

cual ratifica que la misma naturaleza física y química del suelo, pese a los excesos hídricos, constituye un medio para albergar temporalmente los nutrientes aplicados a través de la fertilización; aunque no se descarta que un exceso de humedad, puede haber inducido también a pérdidas de N por desnitrificación.

Por tratarse el suelo de la unidad Quindío de un Andisol, su mineralogía y contenidos de materia orgánica tienen la facultad para exhibir cargas de tipo variable en su fracción sólida, de acuerdo a las condiciones del pH en el medio (17). En tal sentido, al monitorear la acidez de la solución lixiviada a través de los eventos de exceso hídricos a los que fueron sometidos los tratamientos, pudo hallarse que las condiciones de permanente humedad, contribuyeron con el incremento de los valores del pH (Figura 2).

Las reacciones químicas de las que es objeto la urea durante sus estados de transformación iniciales, se reflejaron en el aumento del pH y comenzaron a neutralizarse a partir del día 50, posiblemente por el agotamiento de la molécula.

Con el SAM y el NA, el remanente de acidez se presentó desde el principio del estudio, lo cual podrían dar sustento a la baja presencia de NO_3^- , debido a que en estas condiciones, predominaría la capacidad de intercambio aniónico (CIA) sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El efecto citado también podría estar relacionado con el poder de reemplazo del NH_4^+ que ocasionaría desplazamiento de las bases intercambiables y posterior disminución del pH.

Desde el punto de vista de los cambios en el pH de la fracción sólida del suelo como tal, al final de la evaluación se constató a través de valor del delta de pH, que en cuatro de las seis muestras de suelo de las columnas que recibieron NA, prevalecía la capacidad de intercambio aniónico-CIA- sobre la capacidad de su intercambio catiónico-CIC.

Unidad Chinchiná. En la unidad Chinchiná se mantuvo la tendencia registrada para el NH_4^+ en el suelo de Quindío, y la magnitud de pérdidas al final del período experimental fue prácticamente igual. Sin embargo, a diferencia del suelo anterior, donde la

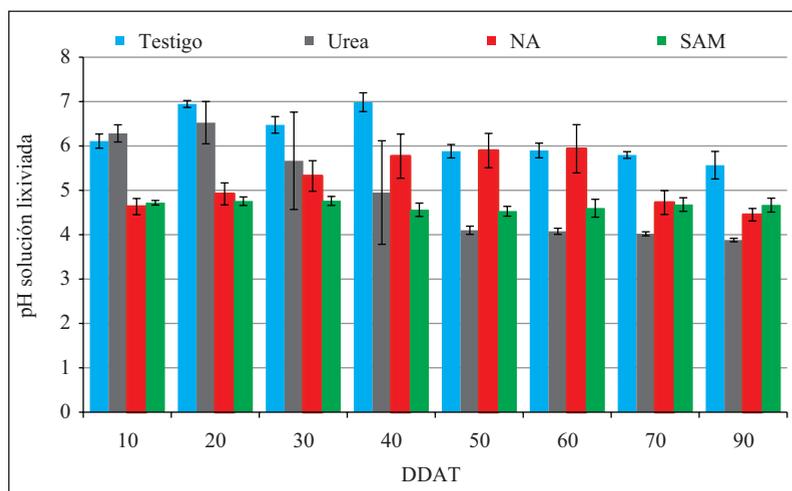


Figura 2. Valores de pH de la solución del suelo después de la aplicación de tratamientos (DDAT).

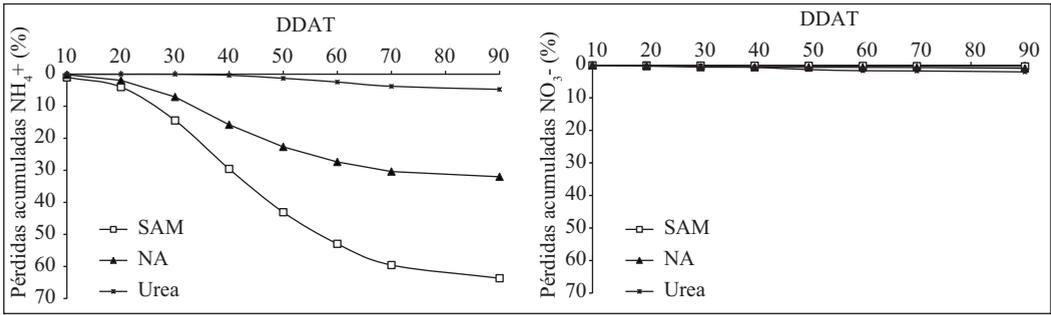


Figura 3. Pérdidas de NH_4^+ y NO_3^- por lixiviación, en suelo de la unidad Chinchiná.

remoción fue evidente desde el primer riego, en la unidad Chinchiná éstas empezaron a manifestarse luego de 30 días, es decir, a partir del riego número tres (Figura 3).

La concentración de nitratos en el agua de percolación, se evidenció a partir del día 20, específicamente en el tratamiento con NA, en donde se alcanzaron niveles de 0,60%. En adelante, los valores en este tratamiento y del SAM se mantuvieron alrededor de 0,60% y 0,28%, respectivamente; mientras que para la urea estuvieron entre 1,7% y 2,0%, y los del testigo fueron cercanos a cero.

La diferencia en el tiempo de aparición de N, particularmente amonio, en la solución entre las dos unidades de suelo, puede relacionarse por una parte con sus características físicas. De esta forma, ante un bajo grado de desarrollo estructural del suelo de la unidad Quindío habría una menor impedancia que facilitaría un patrón de flujo preferencial para los solutos a través del perfil (2).

De otro lado, desde el punto de vista químico, la proporción de materiales no cristalinos y contenidos de materia orgánica, juegan un papel fundamental en la adsorción, bien sea catiónica o aniónica, y en consecuencia en la reducción de pérdidas de nitratos. Estudios de Prado *et al.* (8) en andisoles de México, muestran cómo las propiedades de

este tipo pueden controlar significativamente el movimiento de nitratos a través del perfil, efecto de la atracción electrostática.

Previamente Leon y Pratt (5), demostraron una muy baja remoción de NO_3^- en suelos colombianos cuyo material parental fueron cenizas volcánicas, clasificados entonces dentro de los Andepts. La explicación a este fenómeno se basó igualmente en las consideraciones de tipo químico descritas anteriormente. Finalmente, el pH del efluente por efecto de los tratamientos, se redujo en más de dos unidades con el NA y el SAM, particularmente a partir del segundo período de exceso de humedad (Figura 4).

El delta del pH permitió detectar cómo en los suelos del 70% de las unidades experimentales predominó la CIA con el NA, mientras que cuando se suministró SAM sólo se presentaron estos cambios en el 30% de los suelos correspondientes a dicho tratamiento. La diferencia en los resultados respecto a lo registrado en Quindío, puede estar asociada con la abundancia de materiales amorfos (> 50%) y el mayor grado de desarrollo estructural. Esto indica que ambos suelos, a pesar de la similitud en su génesis, potencialmente pueden exhibir un comportamiento disímil en lo que a la adsorción de iones y otras características físicas y químicas se refiere; lo cual sugiere, que

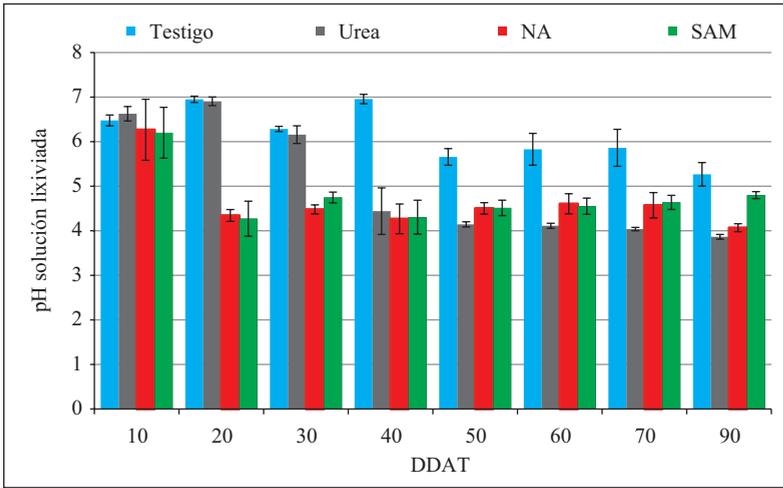


Figura 4. Valores del pH en la solución del suelo después de la aplicación de tratamientos (DDAT).

el seguimiento a propiedades como la CIC, la CIA, el grado de desarrollo estructural y la mineralogía de estos suelos, constituyen en conjunto factores decisivos que permiten explicar el fenómeno de la lixiviación de N en áreas cafeteras de Colombia.

Unidad Doscientos. Para la unidad Doscientos, la lixiviación de N en las dos formas analizadas, fue inferior a las registradas para las unidades Quindío y Chinchiná. Al final de la evaluación, el NH_4^+ perdido fue máximo del 28%, indistintamente tratándose de NA o SAM, mientras que el catión proveniente del

tratamiento con urea fue 1,3%. Del mismo modo, el 0,02% de amonio del testigo puede tener como fuente la mineralización de la materia orgánica (Figura 5).

En cuanto al NO_3^- se refiere, el acumulado de pérdidas por lixiviación fue casi imperceptible y siguió el orden: urea > NA > testigo > SAM, guardando la proporción 1:0,7:0,6:0,2 (Figura 5).

La acidez de la solución, efecto de la aplicación de los fertilizantes, fue similar a la que se presentó en los andisoles estudiados (Figura 6).

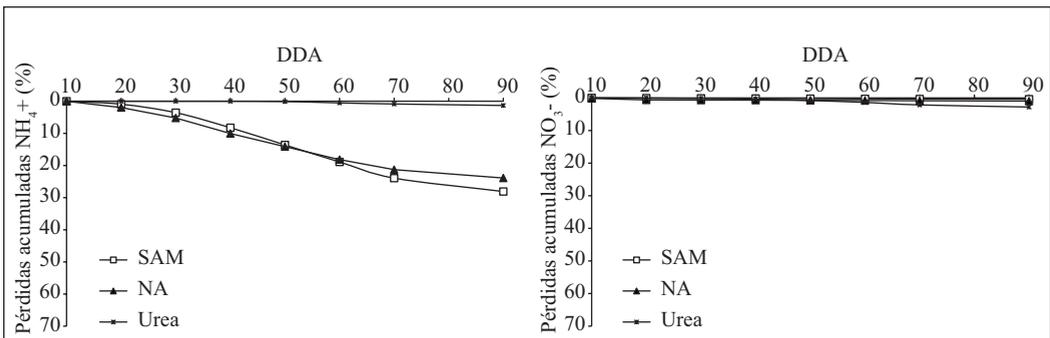


Figura 5. Pérdidas de N-NH_4^+ y NO_3^- por lixiviación, en suelo de la unidad Doscientos.

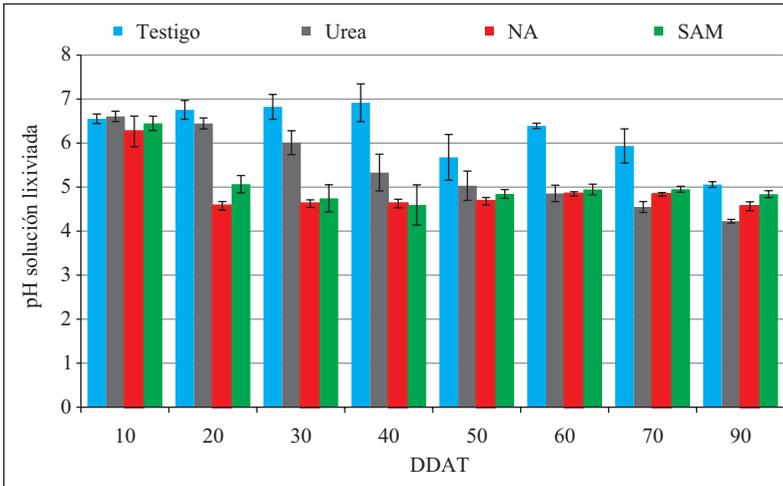


Figura 6. Valores del pH en la solución del suelo después de la aplicación de tratamientos (DDAT).

Los valores del delta del pH indicaron predominio de CIC, aspecto que puede explicar el bajo nivel de amonio lixiviado. Dicho resultado puede asociarse con la acidez de la solución ocurrida durante los riegos efectuados, con el alto contenido de materia orgánica (17%) y las características de la fracción mineral donde se presentó entre 30% y 50% de materiales no cristalinos, posiblemente consecuencia de óxidos de hierro y entre el 15% y 30% de metahaloisita. Esto indica, potencial para desarrollar carga variable, a través del cual se puede explicar al igual que para los suelos anteriores, una baja lixiviación de NO_3^- .

Xiong *et al.* (16) al evaluar las pérdidas de N por lixiviación, luego de suministrar SAM como fuente fertilizante en suelos de carga permanente y suelos de carga variable, constataron para el primer tipo de suelos que, mientras el NO_3^- era repelido químicamente y conducido al efluente, el catión se adhería. Entre tanto, para los suelos de carga variable el efecto resultante fue contrario, es decir, el 92% de las pérdidas del elemento se presentaron en forma de NH_4^+ .

Los resultados de este estudio indican lo imprescindible que resulta considerar la reacción química que en los diferentes tipos de suelo ejercen las fuentes fertilizantes como las evaluadas en este estudio, para un mejor entendimiento de la dinámica del N requerido por el café.

LITERATURA CITADA

1. ARIAS S., E.; SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; MORALES L., C.S. Lixiviación del nitrógeno en algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Cenicafé* 60(3):239–252. 2009.
2. CLOTHIER, B.E.; VOGELER, I.; MAGESAN, G.N. The breakdown of water repellency and solute transport through a hydrophobic soil. *Journal of hydrology* 231–232:255–264. 2000.
3. GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN K., S. Volatilización de nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café (*Coffea arabica* L. var. Castillo). *Cenicafé* 63(1). 2012. Artículo en imprenta.
4. HERRMAN, M.; PUST, J.; POTT, R. Leaching of nitrate and ammonium in heathland and forest ecosystems in northwest Germany under influence of enhanced nitrogen deposition. *Plant and soil* 273:129-137. 2005.

5. LEON S., L.A.; PRATT P., F. Efectos agronómicos de la retención y lixiviación de nitratos en dos Andepts de Colombia. *Turrialba* 24(4):408-413. 1974.
6. MOTAVALLI P., P.; ANDERSON, S.H.; PENGTHAMKEERATI, P. Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability and physical properties of claypan soils. *Field crops research* 84:303-318. 2003.
7. NANZYO, M. Unique properties of volcanic ash soils. *Global environmental research* 6(2):99-112. 2002.
8. PRADO, B.; DUWING, C.; ETCHEVERS, J.; GAUDET, J.P.; VAUCLIN, M. Nitrate fate in a Mexican andosoll: Is it affected by preferential flow?. *Agricultural water management* 98:1441-1450. 2011.
9. PEREGO, A.; BASILE, A.; BONFANTE, A.; DE MASCELLI, R.; TERRIBILE, F.; BRENA, S.; ACUTIS, M. Nitrate leaching under maize cropping systems in Po valley (Italy). *Agriculture, ecosystems and environment* 147:57-65. 2012.
10. REYNOLDS, V.; RICHTER, V.V. Nitrate in groundwater of the Central valley, Costa Rica. *Environment international* 21(1):71-79. 1995.
11. RYAN, M.C.; GRAHAM G., R.; RUDOLPH D., L. Contrasting nitrate adsorption in andisols in two coffee plantations in Costa Rica. *Journal environment quality* 30:1848-1852. 2001.
12. SATRHM, B.D.; HARRISON, R.B.; TERRY, T.A.; FLAMING B., L.; LIXCATA, C.H.; PETERSEN, K.S. Soil solution nitrogen concentrations and leaching rates as influenced by organic matter retention on highly productive Douglas-fir site. *Forest ecology and management* 218:74-88. 2005.
13. SADEGHIAN K., S. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. Chinchiná: CENICAFÉ, 2008. 43 p. (Boletín Técnico No. 32).
14. SADEGHIAN K., S. Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. Chinchiná: CENICAFÉ, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 391).
15. SANZ, C.A.; THOMAS, H.M.; ARCE, A.; MINGOTM, J.I.; DIEZ, J.A.; VALLEJO, A. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. *Agriculture, ecosystems and environment* 126:243-249. 2008.
16. XIONG, Z.Q.; HUANG, T.Q.; M., Y.Ch.; XING, G.X.; ZHU, Z.L. Nitrate and ammonium leaching in variable and permanent charge paddy Soils. *Pedosphere* 20(2):209-216. 2010.
17. ZAMAN, M.; SAGGAR, S.; BLENNERHASSETT, J.D.; SINH, J. Effect of urease and nitrification inhibitors on transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil biology and biochemistry* 41:1270-1280. 2009.

MÉTODO PARA IDENTIFICAR EL MOMENTO FINAL DE LA FERMENTACIÓN DE MUCÍLAGO DE CAFÉ

Aída Esther Peñuela Martínez*; Juan Rodrigo Sanz Uribe*; Jenny Paola Pabón-Usaquén*

RESUMEN

PEÑUELA M., A.E.; SANZ U., J.R.; PABÓN U., J.P.; Método para identificar el momento final de la fermentación de mucílago de café. *Cenicafé* 63 (1): 120-131. 2012

Se desarrolló un método con el cual se puede determinar de manera exacta, precisa y objetiva el momento en el cual finaliza la degradación del mucílago del café por fermentación natural y está listo para ser lavado. Para tal fin, en Cenicafé se realizaron mediciones de la altura de la masa de café en el tanque de fermentación y de la porosidad del café lavado, con un promedio de 7,0% de reducción total de altura de la masa de café y una porosidad de 36,5%. Con esta información se estableció la relación entre la remoción de mucílago y el cambio de volumen de la masa de café por fermentación natural. Se analizaron formas geométricas como cilindro, cono, cono truncado y reloj de arena, con los cuales se pudiera apreciar el cambio de volumen. Se seleccionó el cono truncado con un volumen de 500 mL, que brindó mayor sensibilidad en la determinación indirecta de la remoción de mucílago. Se construyó el dispositivo y se evaluó con café Variedad Castillo®, determinando la relación entre la altura del espacio vacío dentro del dispositivo y el porcentaje de remoción de mucílago de la masa, con un valor mínimo de 95% como criterio de aceptación. Se identificó que cuando la altura del espacio vacío dentro del dispositivo en su lugar más estrecho fue mayor que 85 mm, la remoción de mucílago fue de 95% o mayor, en el 90,8% de los casos. El método propuesto a partir de esta información cumplió con los requerimientos técnicos establecidos y contribuye al control del proceso de beneficio.

Palabras clave: Beneficio de café, remoción de mucílago, densidad aparente.

ABSTRACT

It was developed a method that can accurately, precisely and objectively determine the moment at which coffee mucilage degradation by natural fermentation ends and is ready to be washed was developed. To this end, measurements of coffee mass height in the fermentation tank and of washed coffee porosity with an average of 7.0% of the total coffee mass height reduction and a porosity of 36.5% were performed in Cenicafé. With this information, the relationship between mucilage removal and coffee mass volume change by natural fermentation was established. Geometric shapes such as cylinder, cone, truncated cone and hourglass that allowed the volume change to be seen were analyzed. The truncated cone with a volume of 500 mL, which provided greater sensitivity in the indirect determination of mucilage removal, was selected. The device was built and evaluated using Castillo® Variety coffee by determining the relationship between the height of the empty space inside the device and the mucilage removal percentage of the mass, with a minimum value of 95% as the acceptance criterion. It was found that when the height of the empty space inside the device at its narrowest point was greater than 85 mm, the mucilage removal was 95% or higher in 90.8 % of the cases. The proposed method derived from this data meets the technical requirements and contributes to the coffee process control.

Keywords: Coffee process, mucilage removal, bulk density.

*Investigador Científico I, Investigador Científico II y Asistente de Investigación, respectivamente. Disciplina de Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La fermentación del mucílago de café es un proceso natural en el cual intervienen factores biológicos, químicos y físicos, cuyo principal propósito es la degradación de la estructura del mucílago para ser fácilmente retirado en el lavado. Dada la naturaleza de este proceso, su control se lleva a cabo a través del tiempo, con el cual se determina la finalización del mismo. Diferentes autores han reportado los rangos de tiempo que puede durar este proceso. Wilbaur (15) cita que la fermentación en café frecuentemente dura entre 48 y 60 horas, y a veces más tiempo en regiones frías y de mayor altitud. Cleves (3) menciona que la eliminación del mucílago requiere para casi todos los cafés entre 24 y 36 horas, de acuerdo a la temperatura ambiente. Rolz (14), afirma que el tiempo para completar la fermentación puede variar de 12 a 90 horas, dependiendo del tipo de café y de las condiciones ambientales, y Menchú y Rolz (7), citan que los períodos de fermentación pueden variar entre 12 y 100 horas.

Así mismo, se han referenciado factores que pueden incidir en la duración de este proceso, aunque se desconoce concretamente el efecto de estas variables sobre el tiempo. Entre estos factores se encuentran:

- La temperatura del lugar. El mayor tiempo de fermentación se ha relacionado con las zonas más frías.
- El uso de agua. En la fermentación bajo agua es más lenta la degradación del mesocarpio, lo cual retrasa el inicio de la acidificación. La masa de café se calienta poco durante el proceso, retardando el inicio de la actividad microbiana.

- La cantidad de mucílago en el grano. El café tipo robusta tiene un mesocarpio más delgado y resistente, por lo que necesita de 24 a 36 horas más de fermentación. Estudios realizados por Menchú y Rolz (7), indican que no existe correlación entre la altitud de los cultivos de café variedad Borbón con el contenido de mucílago.
- El grado de madurez del café. Estudios realizados por Puerta (13) confirman que la fermentación requiere menos tiempo cuando el café está maduro.

Para determinar el momento en el cual se debe lavar el café, el caficultor debe recurrir a métodos tradicionales, que se han utilizado para determinar de forma fácil, pero subjetiva, el punto de lavado¹. Mediante un sondeo realizado a caficultores de los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío, Antioquia y Valle del Cauca (10) se indagó acerca del método empleado para determinar el punto final de la fermentación. En este sondeo se encontró que se utilizan métodos tradicionales como son la respuesta al tacto y el método de la estabilidad de un agujero realizado en la masa de café con un madero, con una frecuencia de uso de 30,7% y 30,8%, respectivamente. Así mismo, el 12,3% de los caficultores que participaron en este sondeo, reconocieron que el café debe lavarse varias veces, ante la situación de no identificar este punto adecuadamente, con lo que se aumenta el consumo específico de agua y se incrementa el volumen de agua contaminada. Como principal conclusión de este sondeo, se evidenció la subjetividad en la determinación del momento final de la fermentación y la

¹ **Punto de lavado.** Es el momento del proceso de fermentación de mucílago en el que éste alcanza la degradación total y se pueden retirar sus residuos por medio del lavado, para que no se alteren las características sensoriales del café y el grano pueda continuar con la etapa de secado (2).

necesidad de establecer controles objetivos para este proceso, de gran importancia sobre la calidad del café.

Ante la ausencia de métodos objetivos, debe recurrirse a la recomendación de métodos tradicionales para el control de este proceso. Es así como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura- FAO (9) recomienda la evaluación de la fermentación mediante el tacto, con el cual se percibe una sensación áspera en el pergamino, dado que los granos pierden su textura lamosa. Otros investigadores han tratado de dar control al proceso a través del seguimiento de variables como el pH. Es el caso de investigaciones realizadas por Jackels *et al.* (6), con café de Nicaragua, donde realizaron el seguimiento de la fermentación de mucílago en el laboratorio, estudios en los cuales interrumpieron la fermentación de pequeñas muestras, a través del lavado, cuando el pH de la masa en fermentación decrecía aproximadamente a 4,6; 4,3 ó 3,9, y posteriormente, secaron y tostaron las muestras para evaluar su calidad en paneles de catación. Los resultados mostraron una débil correlación positiva entre el pH del café en el lavado y la calidad. Jackels *et al.* (6), también realizaron el trabajo con caficultores, quienes interrumpieron la fermentación después de un proceso de optimización del tiempo, a través de los valores de pH, para lo cual utilizaron papel de pH estándar, prueba que requirió un tiempo corto de fermentación para finalizar con un valor de pH relativamente alto para el proceso que es llevado a cabo.

En diferentes manuales y guías del proceso de beneficio publicados en países donde realizan el proceso por vía húmeda, tales como Costa Rica (3), IHCAFÉ en Honduras (4), Anacafé (1) y el IICA (5) en Guatemala, se recomienda determinar el momento final

de la fermentación del mucílago del café, a través de los dos métodos mencionados anteriormente.

En Cenicafé se realizó la evaluación de los dos métodos (Figura 1) más utilizados por los caficultores, para la determinación del momento final de la fermentación, con el fin de establecer su eficacia (12). En el método del orificio en la masa se introdujo un trozo de madera de sección circular a la masa de café contenida en el tanque, a una profundidad de penetración de 30 cm, hasta que no hubo caída de los granos dentro del agujero, observación con la cual se registró respuesta afirmativa según el método (punto lavado). En el método del tacto se tomaron muestras de 25 a 30 g de la superficie de la masa de café en proceso de fermentación, se lavaron con agua limpia y se frotaron en las manos, Cuando la muestra se sintió carrasposa, a criterio de expertos en beneficio, se registró respuesta afirmativa según el método (punto de lavado).

Estos dos métodos fueron evaluados en el tiempo, considerando cuatro alturas de llenado del tanque, 100%, 75%, 50% y 25%, y dos clases de materia prima, café sin clasificar y clasificado, antes del proceso de despulpado. El tiempo promedio obtenido con el método de orificio en la masa identificó el punto de lavado cuando el proceso de fermentación presentó en promedio 7,29 h, y con el método del tacto, el tiempo del punto de lavado se registró a las 10,23 h, en promedio, después de iniciado el proceso. Con ambos métodos, el tiempo determinado para lavar el café fue diferente del momento determinado con el método de referencia, es decir, cuando se detecta que la remoción de mucílago es superior al 97% mediante reacción con enzima pectinolítica, el cual es de 15,5 ±0,9 horas.



Figura 1. Métodos tradicionales utilizados por el caficultor, para determinar el momento de finalización de la fermentación del café. **a.** Orificio en la masa de café; **b.** Método del tacto.

Los métodos tradicionales utilizados por los caficultores para identificar el punto de lavado presentaron respuesta afirmativa mucho antes de degradar completamente el mucílago. Adicionalmente, presentaron diferencias entre ellos, en el tiempo de respuesta, siendo mayor para el método del tacto. Con el tiempo determinado se obtuvieron porcentajes de remoción en promedio de 58% y 74%, para los dos métodos, respectivamente. En este estudio se incluyó el análisis de variables como la temperatura, el pH y la resistencia de la masa al punzonamiento, con el fin de establecer la relación de estas variables con el porcentaje remoción de mucílago y utilizarlas como variables potenciales para determinar el punto de lavado del café. Se determinó que la calidad de la materia prima tuvo efecto sobre la respuesta en la temperatura, el pH y la resistencia al punzonamiento. La respuesta de la última variable también se afectó por la cantidad de café en el tanque. Adicionalmente, se obtuvo alta dispersión de los valores. Se concluyó que las variables evaluadas no son adecuadas para el desarrollo del método requerido.

Dada la necesidad de un método que determine fácil y objetivamente el momento de finalización de la fermentación natural, este

trabajo de investigación tuvo como propósito desarrollar un método sencillo para que el caficultor identifique el momento adecuado para lavar el café, con al menos 90% de confiabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del método se tuvieron en cuenta los resultados reportados por Peñuela (11), de observaciones realizadas a la masa de café en fermentación, en las cuales se apreció una pérdida de volumen del café despulpado al café lavado, con valores entre 5,6% y 9,7%. La reducción de volumen puede estar entre 11,9% y 13,1%, basado en los cambios de densidad aparente (8) y en una pérdida de masa del 25%, correspondiente al mucílago, entre los dos estados mencionados (12).

El desarrollo del método constó de tres etapas, las cuales fueron llevadas a cabo en las instalaciones de Cenicafé, (Manizales, Caldas). En la primera etapa se realizó el análisis de la disminución de la altura de la masa de café en los tanques de fermentación, considerando dos estados del proceso: Café despulpado (entrada) y café lavado (salida), también se determinó la porosidad del café

lavado. En la segunda etapa, se realizó el diseño y la selección del instrumento para determinar el punto final de la fermentación. En la tercera etapa se realizó la evaluación del dispositivo en el laboratorio.

Etapa I. Análisis de las propiedades físicas de la masa de café. Las pruebas se realizaron en el beneficiadero de Cenicafé, en tanques para disponer el café y remover el mucílago por fermentación natural, con café Variedad Castillo®, procedente de la Estación Central Naranjal. Se determinó la disminución de altura de la masa de café en el proceso de fermentación y el porcentaje de porosidad de la masa de café lavado. Esta información fue registrada en 10 lotes de café procesados en diferentes tiempos de proceso.

El café fue procesado según el protocolo definido por Cenicafé, para la obtención de semilla Variedad Castillo®. Una vez depositado el café despulpado en el tanque, se dejó el drenaje abierto para permitir la salida del mucílago degradado durante el proceso de fermentación. Se midió la altura de la masa, para lo cual se colocó una regla y ésta se marcó con la altura inicial. Al final del proceso se determinó el porcentaje de remoción de mucílago, según el procedimiento establecido por Peñuela (12), hasta alcanzar un valor mayor que 95%, momento en el cual nuevamente se midió la altura de la masa de café en el tanque.

Adicionalmente, se determinó el porcentaje de porosidad de la masa de café lavado, teniendo en cuenta que la masa de granos de café lavado presenta espacios intergranulares ocupados por el aire (intersticios). Estos espacios pueden ser ocupados por el mucílago degradado en el proceso de fermentación. Para esta determinación se utilizó el siguiente procedimiento; se utilizó un recipiente con volumen de 1.000 mL, se llenó con café

lavado al ras y, luego, se adicionó agua hasta alcanzar el nivel máximo del recipiente. Posteriormente, se drenó el agua y se recolectó en una probeta para determinar su volumen. El volumen de agua, representó el volumen de los espacios vacíos. Para estimar el porcentaje de porosidad del café lavado se utilizó la Ecuación <<1>>:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} \quad \text{<<1>>}$$

Donde:

ε : Porosidad del café lavado (Decimal)

V_v : Volumen de agua (mL)

V_T : Volumen total del recipiente (mL)

Se estimaron el promedio y la desviación estándar, tanto para la reducción de altura como para la porosidad del café lavado.

Etapa II. Diseño del dispositivo. Con el fin de definir la forma, características y dimensiones de un dispositivo que permitiera potenciar las diferencias de volumen mencionadas, se utilizó el cálculo infinitesimal con el propósito de estimar teóricamente las características del dispositivo y hacer un proceso de optimización. En este proceso se seleccionaron las dimensiones que facilitarían la aplicación del mismo.

Para tal fin se tomaron como criterios de optimización los parámetros sensibilidad y magnitud de la lectura. El proceso de optimización consistió en determinar la mayor sensibilidad y la mayor magnitud de la lectura, con un volumen y forma manejables, y una geometría sencilla.

En primera instancia, por observación, se determinó que un recipiente perforado, con un volumen de 500 mL y una altura máxima de 250 mm, son parámetros que

permiten producir una respuesta confiable para cualquier carga de café despulpado que se deposite en los tanques de fermentación. Así mismo, se determinó que un área perforada de 55% es suficiente para contener la masa de café y permitir el drenado del mucílago degradado en el proceso.

Para determinar la sensibilidad y la magnitud de la medida se realizó el análisis diferencial sobre el volumen y la altura del espacio que queda vacío a medida que se degrada el mucílago de la masa de café contenida en el recipiente. De este análisis resultan las relaciones dV/V y dh/H que están relacionadas entre sí por las características geométricas del recipiente perforado, donde V es el volumen total que abarca el recipiente, dV el volumen de espacio vacío, H la altura total del recipiente perforado y dh la altura del espacio vacío (Figura 2).

La relación dh/H está asociada al parámetro sensibilidad y su numerador a la magnitud de la medida del recipiente. A mayor sensibilidad y magnitud la medida es fácilmente observable.

En el diseño se estudiaron diferentes geometrías (Figura 3), como un cilindro,

un cono regular, un cono truncado recto y dos conos truncados invertidos unidos en su parte más estrecha por un cilindro, en forma de reloj de arena. De ellos, se seleccionó el sistema que presentó mayor sensibilidad y mayor magnitud a través de un proceso de optimización sobre la variable O , resultante del producto entre sensibilidad y magnitud, dh/H y dh , respectivamente, como aparece en la Ecuación <<2>>. Con este análisis se definió que la variable de optimización O tuviera el mayor valor posible. Para la selección también se tuvieron en cuenta las especificaciones de masa y altura mencionadas, lo mismo que la facilidad de construcción, con el fin de aplicar la metodología de Diseño para la Manufactura Económica, DEM (por sus siglas en inglés).

$$O = \frac{(dh)^2}{H} \quad \ll 2 \gg$$

Como resultado de esta etapa, se obtuvo el diseño del dispositivo, que fue seleccionado de acuerdo al valor más alto para la variable O , teniendo en cuenta las especificaciones de diseño, para realizar la construcción de los dispositivos y pasar a la etapa de evaluación.

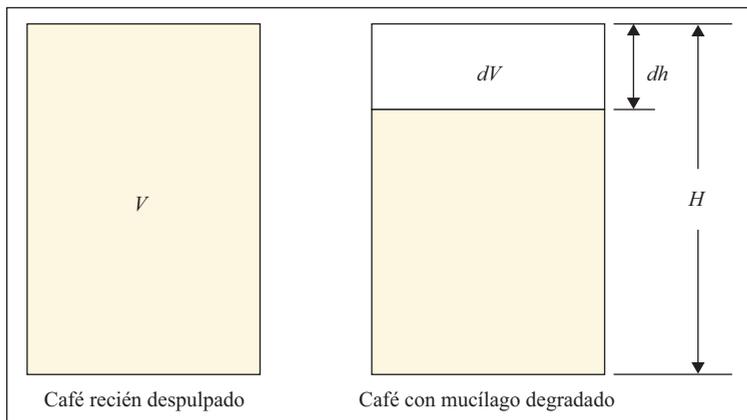


Figura 2. Reducción de volumen del cambio de estado del café en la etapa de beneficio.

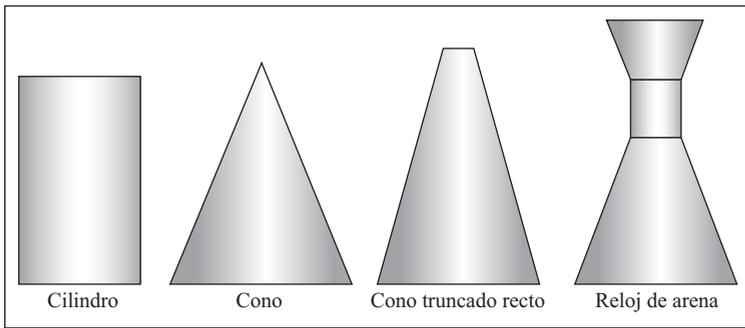


Figura 3. Formas de recipientes estudiados.

Etapa III. Evaluación. Con los dispositivos contruidos se realizaron 70 pruebas, y se determinó la eficacia del método. Esta etapa se desarrolló en el beneficiadero experimental de Cenicafé, con café Variedad Castillo®, procedente de la Estación Central Naranjal. El café fue procesado bajo los criterios de procesamiento de la semilla de café, dispuestos por Cenicafé. Una vez se obtuvo el café recién despulpado, en cada prueba, se llenó el dispositivo a ras, por la base mayor, se aseguró la tapa y se dispuso el dispositivo dentro de la masa de café, para iniciar el proceso de fermentación.

A partir de 12 horas de fermentación, se determinó el porcentaje de remoción de mucílago, según procedimiento establecido por Peñuela, se registró la altura del espacio vacío dejada por la masa de café dentro del dispositivo, por cada hora, hasta que la masa de café alcanzó una remoción mayor que 95%, considerada suficiente para determinar el punto final del proceso de fermentación sin afectar la calidad del café.

Como variables del proceso se tuvieron: Remoción de mucílago (%) y altura del espacio vacío dentro del dispositivo (mm).

Se estimaron el promedio y la variación del variables porcentaje de remoción de mucílago y de la altura del espacio vacío dentro del

dispositivo. Así mismo, se determinó el coeficiente de determinación entre las dos variables analizadas, con el fin de corroborar el comportamiento teórico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa I. Análisis de las propiedades físicas de la masa de café. En la Tabla 1 se observa que la disminución de la altura de la masa de café en el tanque, desde el estado despulpado hasta la finalización del proceso de fermentación, tiene un promedio de 7,0%, en un rango entre 5,6% y 9,7%. Esta disminución representa la pérdida de volumen de la masa, dada por la degradación del mucílago, el cual va drenando hacia la parte inferior del tanque a través de los granos que componen la masa y sale por la rejilla de evacuación de mieles.

La masa de café lavado presentó un promedio de la porosidad de 36,5%, en un rango entre 35% y 38%, y con una desviación estándar de 1,3%. Con esta información, se concluyó que el mucílago degradado que no es evacuado del tanque, tiene espacio suficientemente en los intersticios que se van generando entre los granos, a medida que se pierde la capa de mucílago sobre el pergamino en el proceso de fermentación, en razón a que el contenido inicial de mucílago de una masa de café despulpado es 25% de la masa, en promedio.

Tabla 1. Valores promedio, mínimo y máximo para la altura inicial, final de la masa de café en fermentación y para el porcentaje de disminución de altura.

	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Disminución de altura (%)
Promedio	21,7	20,2	7,0
Mínimo	15,0	14,0	5,6
Máximo	27,0	25,0	9,7
Desviación Estándar	3,72	3,56	1,3

Como resultado de esta etapa, se identificó la posibilidad de utilizar como principio de diseño del método, el cambio de volumen de la masa de café en el proceso de fermentación, apreciable a través de un dispositivo con un volumen de control.

Etapa II. Diseño del dispositivo. La Figura 4 presenta una gráfica donde pueden compararse las formas geométricas de los dispositivos, analizados a través del cálculo diferencial. La gráfica representa en el eje x el cambio de volumen (dV/V) y en el eje y la relación dh/H , la cual está asociada a la sensibilidad del instrumento. Los resultados muestran que los conos, con un ángulo total de 20° , con un volumen total del recipiente de 500 mL, son la forma geométrica en la que más se potencia la disminución de volumen esperado, con valores entre 11,9% y 13,1% para el cono recto, seguido del cono truncado. El recipiente en el que menos se observa el cambio de volumen es el cilíndrico (o prismático) y el recipiente en forma de reloj de arena tiene una sensibilidad media entre los conos y el cilindro, aunque se destaca como una ventaja la mayor pendiente en el rango de disminución de volumen esperado, lo que significa una mayor resolución que las demás formas geométricas.

Para hacer una evaluación de la geometría y su comportamiento en los dispositivos, se tomó como referencia el valor de disminución de volumen del 12,5%, por estar ubicado en la mitad de los límites entre los que se

esperan los resultados. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para la variable de optimización O en esas condiciones, calculada con la Ecuación <<2>>. Al igual que el análisis anterior, para la sensibilidad, el valor más alto para la variable de optimización se obtuvo con el recipiente de forma cónica, seguido del recipiente con forma de cono truncado. El recipiente en forma de reloj de arena presentó un valor medio para la variable de optimización. El cilindro presenta un valor de la variable de optimización significativamente bajo.

No obstante los resultados para el cono recto, se seleccionó el recipiente con forma de cono truncado en razón a que la parte superior del primero es difícil de llenar completamente, dado el tamaño de los granos de café, lo que hace que en la práctica funcione igual que un recipiente en forma de cono truncado recto.

Una vez seleccionado el cono truncado y con la información de la Tabla 2, se identificó que cuando se alcanza una remoción de mucílago mayor que 95%, el valor teórico de la altura del espacio vacío dentro del dispositivo es mayor o igual que 83 mm, valor que se corroboró en la Etapa III.

Una vez se tuvo una geometría seleccionada, se realizó la construcción de los dispositivos, para lo cual se seleccionó como material de construcción malla plástica 5000, dado que cumple con las características de área perforada,

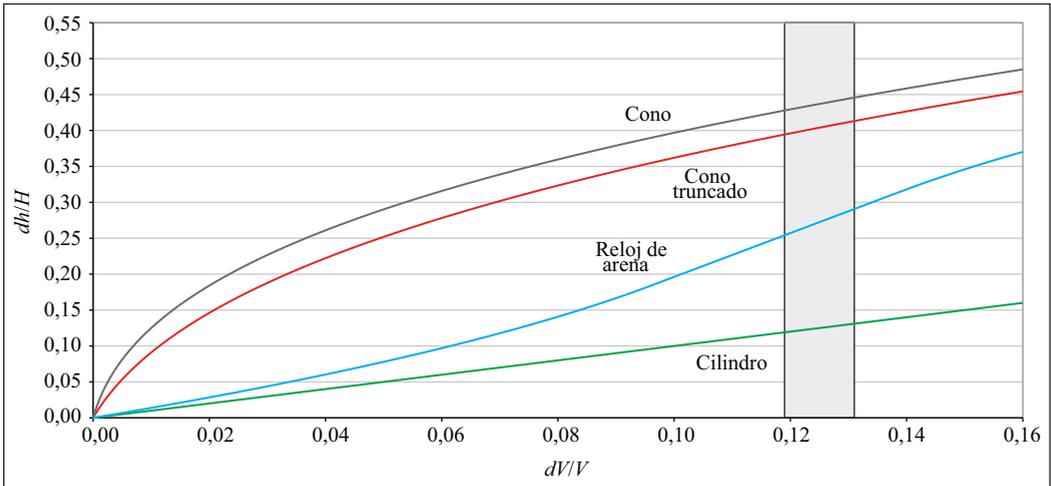


Figura 4. Cambio relativo de altura con respecto al cambio de volumen.

Tabla 2. Variable de optimización para una diferencia de volumen del 12,5%

Forma Recipiente	dh/H [dec.]	H [mm]	O [mm]
Cono recto	0,4369	248,5	47,4282
Cono truncado recto	0,4039	206,4	33,6719
Reloj de arena	0,2724	232,0	17,2144
Cilindro	0,1250	250,0	3,9063

además es lavable, inerte, liviana, resistente y rígida. La tapa inferior se construyó en malla expandida aplanada, en acero inoxidable, con perforaciones muy similares a las de la malla plástica, se consideró este material por tener las mismas características de la malla plástica, pero además por ser resistente a la deformación ocasionada por el peso del café dentro del dispositivo. La unión de las dos piezas consiste en un sistema de dos aros roscados con dos giros, colocados uno en el cono y otro en la base, contruidos en Poliamida 6 de 10 mm de espesor. Se diseñó un arnés en acero inoxidable en el que se introdujo la malla, con el fin de observar la altura del espacio vacío y la marca del punto final de fermentación. En la Figura 5 se muestra el prototipo diseñado y construido.

Etapa III. Evaluación. La Figura 6 muestra los datos experimentales para las dos variables analizadas al final del proceso de fermentación, altura del espacio vacío dentro del dispositivo y remoción de mucílago. Se observa una relación directa, dado que a mayor valor para la altura del espacio vacío, mayor valor del porcentaje de remoción de mucílago, por lo cual se concluyó que la dimensión dada por el dispositivo, explica la remoción de mucílago en un 99%, de acuerdo al coeficiente de determinación obtenido. La Ecuación <<3>> corresponde a la regresión lineal que explica la relación que existe entre las dos variables:

$$Rm = (0,011154 \text{ mm}^{-1}) h \quad \text{<<3>>}$$

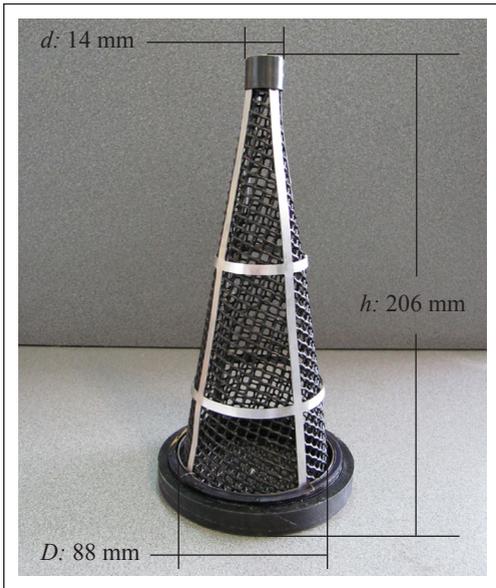


Figura 5. Prototipo diseñado y construido, de cono truncado, para la determinación del punto final de la fermentación.

Donde:

R_m : Remoción de mucílago (Decimal)

h : Altura del espacio vacío dentro del dispositivo (mm)

Con este análisis se determinó también que cuando la remoción de mucílago es

superior al 95%, la altura del espacio vacío es mayor o igual que 85 mm, muy cerca del valor teórico determinado (83 mm). Esta respuesta se presentó en el 90,8% de las pruebas realizadas, indicando un error del 9,2%, el cual fue ocasionado por la variación en el volumen de los dispositivos disponibles para las pruebas. Para disminuir ese error se diseñaron dispositivos fabricados en serie, mediante la técnica de prototipado rápido, que garantiza igual volumen para todas las piezas. El dispositivo fabricado y definitivo se muestra en la Figura 7.

Se realizaron siete pruebas del método usando este prototipo bajo las mismas condiciones de evaluación del dispositivo anterior. Como resultado se obtuvo una remoción de mucílago mayor a 95% cuando la altura del espacio vacío fue mayor o igual a 85 mm, en todas las pruebas realizadas.

Se puede concluir que:

Con base en el análisis de algunas propiedades físicas de la masa de café en el proceso de fermentación, se desarrolló un método indirecto para determinar objetivamente el momento final de la fermentación, basado en

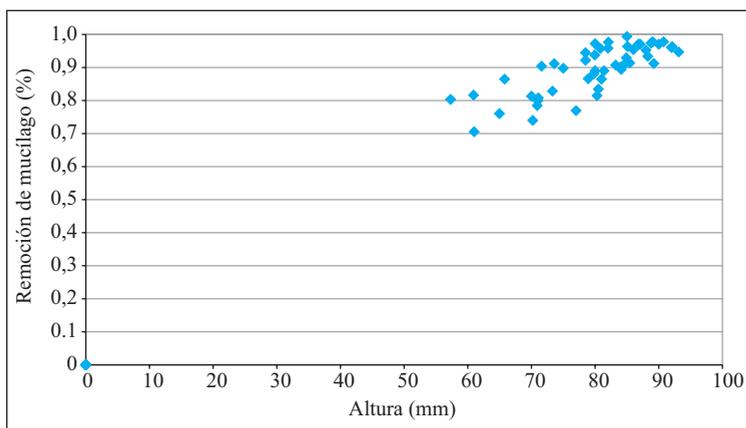


Figura 6. Relación del porcentaje de remoción de mucílago por fermentación natural con la altura del espacio vacío del dispositivo diseñado.



Figura 7. Prototipo definitivo del dispositivo utilizado para el método propuesto.

el cambio de densidad de la masa, apreciada por un cambio de volumen y relacionada con el porcentaje de remoción de mucílago. El método propuesto es confiable, exacto, de bajo costo y resulta fácil de usar, además permitirá disminuir los riesgos de deterioro en la calidad del café.

La forma de cono truncado en un volumen de 500 mL y un área perforada de 55% fue la configuración que mayor número de ventajas presentó para ser usado en esta aplicación.

Con la metodología utilizada para este desarrollo se logró obtener un error aceptable en la determinación del momento final de fermentación, relacionada con el porcentaje de remoción de mucílago, logrando la confiabilidad mínima deseada, aun con los dispositivos elaborados manualmente.

El método propuesto además de ser de fácil uso, no requiere de instrumentos

ni mediciones externas a la masa de café dentro del tanque, con lo que la etapa de fermentación adquiere un control sencillo y objetivo del proceso, sin complicar las labores en la finca.

El desarrollo resultado de esta investigación tiene alta posibilidad de ser industrializado con el fin de obtener dispositivos económicos para que sean asequibles por los caficultores. Así mismo, poder realizar la divulgación de este método de manera masiva para la producción de café con procesos controlados objetivamente, como es requerido cada vez con mayor frecuencia en el mercado.

La producción industrial permitirá obtener dispositivos con mayor estabilidad dimensional que los utilizados en esta investigación, por lo cual se espera una reducción considerable del error del método.

Se propone evaluar este método bajo condiciones de campo, con lo cual además de los aspectos técnicos bajo una amplia variabilidad de condiciones, se obtenga información acerca de la aceptación del método por el potencial usuario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan los agradecimientos la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, financiadora de esta investigación, ING1123. Al personal de la Disciplina de Ingeniería Agrícola, especialmente a los ingenieros Paula Ramos G. y Mauricio García Navarro, y al Doctor Carlos Oliveros por sus aportes y colaboración.

LITERATURA CITADA

1. ANACAFÉ. Manual de beneficiado húmedo del café. Guatemala : Anacafé, 2005. 250 p.

2. CENICAFÉ. Cartilla cafetera. p. 162–163. Chinchiná : Federación Nacional de Cafeteros : Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2004.
3. CLEVES, R. Tecnología en beneficiado de café. San José de Costa Rica : Tecnicafé internacional : Impresora Tica, 1998. 223 p.
4. IHCAFÉ. Beneficiado y Calidad del Café. p. 213 –241. Manual de caficultura. Tegucigalpa : IHCAFÉ, 2001
5. IICA. Guía para el beneficio de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. Guatemala : IICA, 2010. 107 p.
6. JACKELS, S.C.; JACKELS, C.F.; VALLEJOS, C.; KLEVEN, S.; RIVAS, R.; FRASER D., S. Control of the coffee fermentation process and quality of resulting roasted coffee: Studies in the field laboratory and on small farms in Nicaragua during the 2005-06 harvest. p. 434-442. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. (21 : Septiembre 11-15 2006 : Montpellier). París : ASIC, 2006.
7. MENCHÚ, J.F.; ROLZ, C. Coffee fermentation technology. *Café cacao* the XVII(1):53-61. 1973.
8. MONTILLA P., J. Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café. Manizales : Universidad de Caldas. Facultad de ciencias agropecuarias, 2006. 107 p. Tesis: Ingeniera agrónoma.
9. FAO. Roma, Italia. [En línea]. Disponible en internet: http://www.coffee-ota.org/glossary.asp?lang=es#P151_29560. Consultado en Diciembre de 2006.
10. PEÑUELA M., A.E. Informe anual de actividades Sep 2005 – Oct 2006. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 8 p.
11. PEÑUELA M., A.E. Informe anual de actividades Sep 2008 – Oct 2009. Chinchiná : CENICAFÉ, 2009. 20 p.
12. PEÑUELA M., A.E. Estudio de la remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. Manizales : Universidad de Manizales, 2010. 82 p. Tesis: Magister en desarrollo sostenible y medio ambiente.
13. PUERTA Q., G.I. El beneficio y la calidad del café: Documento interno. Chinchiná : CENICAFÉ, 1995. 40 p.
14. ROLZ C. Coffee fermentation studies. p. 259-269. Lisboa : ASIC, 1972.
15. WILBAUX, R. Beneficio del café. Roma : FAO, 1972. (Boletín no oficial de trabajo No. 20).

VOLATILIZACIÓN DEL NITRÓGENO A PARTIR DE DIFERENTES FUENTES FERTILIZANTES EN LA ETAPA DE CRECIMIENTO VEGETATIVO DEL CAFÉ

Hernán González Osorio*, Siavosh Sadeghian Khalajabadi*

RESUMEN

GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN K., S. Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. Revista Cenicafé 63 (1): 132-143. 2012

El nitrógeno (N) es un nutrimento indispensable para el crecimiento y la producción del café, siendo la urea la fuente más común para proporcionarlo al cultivo, debido a su alta concentración y relativo bajo costo. Cuando este fertilizante llega al suelo, su transformación genera pérdidas de N por volatilización. Con el objetivo de encontrar nuevas opciones que conduzcan a mejorar la eficiencia en el uso de este nutrimento, se evaluaron las pérdidas de N por volatilización a partir de la urea, sulfato de amonio (SAM) y el fertilizante Sulfammo®, en un cafetal en crecimiento vegetativo, ubicado en un *Pachic Fulvudand*, de la Estación Central Naranjal. La evaluación tuvo lugar en dos épocas del año. El promedio acumulado de pérdidas a partir de la urea varió entre 21% y 28%, diferencias que se atribuyeron a la lluvia y a los cambios en la humedad del suelo. Las pérdidas a partir del SAM y del Sulfammo®, fueron inferiores a las de la urea en 94% y 43%, respectivamente. Con la aplicación de la urea y el Sulfammo® el pH del suelo se incrementó en una unidad en los primeros 5 cm de profundidad, en tanto que con el SAM disminuyó en 0,33 unidades.

Palabras clave: Fuentes de nitrógeno, Andisol, acidez del suelo, zona cafetera colombiana.

ABSTRACT

Nitrogen (N) is an essential nutrient for coffee growth and production, and urea is the most common source to provide the crops with, due to its high concentration and relatively low cost. When the fertilizer reaches the ground, processing generates N losses by volatilization. In order to find new options that lead to improve efficiency in the use of this nutrient, N losses by volatilization from urea, ammonium sulfate (AMS) and Sulfammo® fertilizer were evaluated in a coffee plantation in vegetative growth, located in a *Pachic Fulvudand*, Central Station Naranjal. The evaluation took place in two moments of the year. The cumulative losses average from urea varied between 21 % and 28 %, these differences were attributed to rainfall and to changes in soil moisture. Losses from AMS and Sulfammo® were lower than those of urea in 94 % and 43 %, respectively. With the application of urea and Sulfammo®, the soil pH increased by one unit in the first 5 cm of depth, while AMS decreased by 0.33 units.

Keywords: Nitrogen sources, Andisol, soil acidity, Colombian coffee zone.

*Investigador Científico I, e Investigador Científico II, respectivamente, Disciplina de Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La expresión biológica de los cultivos depende en gran parte de un ajustado programa de fertilización. La eficiencia de dicha práctica está condicionada tanto por la oportunidad y pertinencia de la labor, como por los factores edáficos y climáticos predominantes en la localidad donde se establezca la plantación (1).

Para el cultivo de café durante su etapa de crecimiento vegetativo se sugiere aplicar entre 50 y 60 g de N por planta (21), cantidad que representa entre 250 y 600 kg/ha, según la densidad de siembra (entre 5.000 y 10.000 plantas/ha) y el contenido de materia orgánica. Dicho requerimiento puede proporcionarse con fertilizantes como la urea, DAP, nitrato o sulfato de amonio, nitrato de calcio o de magnesio, y algunos complejos granulados. Dentro de este conjunto, la urea presenta la mayor acogida entre los caficultores de Colombia, porque aparte de su alta concentración, presenta un relativo bajo costo, aunque su eficacia agronómica aun es objeto de discusión en el ámbito científico y comercial, debido a que algunos resultados experimentales demuestran que cerca del 30% del N que contiene puede perderse por volatilización (16), esto sin contar con otras formas del elemento que son inmovilizadas por el componente vivo del suelo o las que se pierden por lixiviación (8).

Por las anteriores circunstancias, durante los últimos años se vienen planteando estrategias para mejorar la eficiencia de la fertilización con N, a través de métodos y épocas de aplicación entre los que se incluye su fraccionamiento (18) y el uso de diferente tipo de recubrimiento (22, 24, 26), entre otras. Sumado a esto, permanece latente el interés por reducir costos, dada la tendencia creciente en los precios de los fertilizantes, estimulada por la demanda

mundial para satisfacer los requerimientos de los cultivos cuyos objetivos son la generación de alimentos y biocombustibles (23); sin dejar a un lado la necesidad de que dichas prácticas contribuyan a disminuir la contaminación de los suelos, la atmósfera y las fuentes de agua.

Dada la importancia del N para el café y la necesidad de encontrar nuevas opciones que mejoren la eficiencia en su aplicación, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la volatilización del N a partir de diferentes fuentes fertilizantes en plantaciones de café, en la fase de crecimiento vegetativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo entre octubre de 2010 y octubre de 2011, en la Estación Central Naranjal, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas) a 4° 58' N y 75° 39' W, con una altitud de 1.381 m, precipitación anual de 2.782 mm, temperatura media de 20,9°C, brillo solar de 1.763 h.año⁻¹ y 75% de humedad relativa. Los suelos de la Estación corresponden a la unidad cartográfica Chinchiná, clasificados como *Pachic Fulvudand* (materiales no cristalinos > 50%) y con las siguientes propiedades en los primeros 20 cm de profundidad: Materia orgánica 12,2%, pH 5,1, Ca 1,8 cmol_c.kg⁻¹, Mg 0,25 cmol_c.kg⁻¹ y K 0,15 cmol_c.kg⁻¹.

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto se realizaron dos experimentos en una plantación de café Variedad Castillo® Naranjal, sembrada a 1,3 x 1,3 m en agosto de 2010. En el primer experimento, realizado en octubre de 2010, se evaluó la volatilización del N a partir de la urea perlada (46% de N) y sulfato de amonio-SAM (21% de N y 24% de S). La dosis empleada para cada fuente fue de 3 g de N, aplicado superficialmente a 20 cm del

tallo de la planta. Se utilizó un diseño estadístico completamente aleatorio, con tres tratamientos (las dos fuentes de N y un testigo sin N) y diez repeticiones.

Para determinar las pérdidas de N-NH₃ por volatilización, se utilizó la metodología descrita por Lara *et al.* (11). Esta consiste en un colector tipo semiabierto-estático, al interior del cual se instalan dos discos de espumas de poliuretano impregnadas con solución 0,5N de H₂SO₄ y glicerina al 3%. La espuma inferior ubicada a 20 cm desde la superficie, tiene como objetivo capturar el amoniaco de los tratamientos, en tanto que la espuma superior, localizada a 35 cm, cumple la función de adsorber el compuesto que alcanza a ingresar desde la atmósfera.

Durante los siguientes 5 días después de la aplicación de los tratamientos, y a los 10, 20 y 30 días, se retiraron las espumas inferiores, se lavaron con 500 mL de agua desionizada y de allí se tomó una alícuota de 20 mL para determinar la concentración de N-NH₃ por destilación. La espuma superior se descartó.

Para cada fecha de muestreo se hizo un análisis de varianza bajo el diseño experimental empleado y se compararon los valores promedio de los tratamientos mediante la prueba de Tukey al 5%. Adicionalmente se evaluaron diferentes modelos de regresión con el fin de describir el comportamiento del N volatilizado a través del tiempo.

Una vez realizada la última valoración, en el 50% de las unidades experimentales de cada tratamiento, se tomaron muestras de suelo a 5 cm de profundidad y se determinó el pH (método potenciométrico, relación p/p 1:1). Como variables complementarias se tuvieron los registros de lluvia, temperatura y humedad del suelo.

En el segundo experimento, desarrollado en octubre de 2011, con la misma dosis de N se determinó la volatilización generada por la urea perlada (46% de N) y Sulfammo 26®, fertilizante nitrogenado de liberación gradual con recubrimiento, cuya composición química comprende 26% de N, 7% de CaO, 3,5% de MgO, 9% de S y 0,3% de B. El diseño estadístico (completamente aleatorio) contó con tres tratamientos (dos fuentes de N y un testigo sin N) y ocho repeticiones. Las valoraciones de las pérdidas de N-NH₃ se realizaron 1, 2, 3, 4, 5, 10 y 20 días después de la aplicación de los fertilizantes. Los resultados obtenidos fueron analizados a través de la metodología aplicada en el primer experimento. También se evaluó el pH y se midieron las variables climáticas, entre ellas el índice de acumulación de la humedad del suelo de acuerdo con el modelo de Ramírez *et al.* (20).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Experimento I-Volatilización del N suministrado a partir de la urea y el SAM. Cuando se utilizó urea, las pérdidas del elemento por volatilización fueron relativamente altas en los dos primeros días (3,4% y 8,1%, respectivamente), luego se redujo gradualmente, hasta alcanzar valores inferiores al 1% en la última evaluación (Figura 1), posiblemente como consecuencia del agotamiento de la molécula o por su incorporación en el suelo, donde continúan las transformaciones, mediante la acción de un grupo de microorganismos de reconocida ubicuidad en las áreas agrícolas (9).

Es oportuno aclarar que la hidrólisis y posterior volatilización del N contenido en la urea, se registra a través de la imprescindible mediación de un componente vivo, que al producir ureasa (26) genera un ambiente de basicidad, en el cual el suelo que circunda

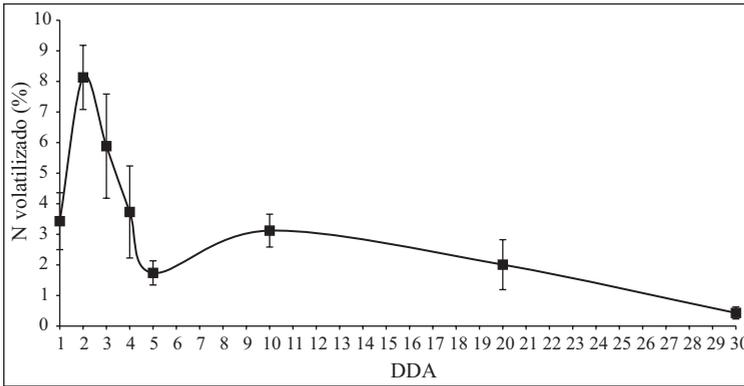


Figura 1. Volatilización de N-NH₃ a partir de la urea, durante los 30 primeros días después de su aplicación (DDA). Nota: Los valores de volatilización que se presentan en el día diez, corresponden al acumulado de los últimos 5 días. Los días 20 y 30 ilustran el acumulado de 10 días. Barras verticales indican intervalos de confianza con un coeficiente del 95%.

este fertilizante alcanza un pH inicial igual o mayor a 8,0 (19).

Para el SAM el fenómeno de volatilización del N fue casi nulo, tanto por su composición estrictamente amoniacal como por el ambiente ácido que genera su hidrólisis (6). Sin embargo, no se descarta que alguna fuente de alcalinidad presente en el suelo como OH⁻ o iones tipo bicarbonato, liberados durante el proceso de absorción de aniones por las plantas, pueda contribuir en alguna medida para que las pérdidas se presenten. Este tipo de argumentos pueden explicar la volatilización durante los dos primeros días de evaluación, cuyo valor máximo alcanzado fue de 1,2% (Figura 2). Luego de este período, las pérdidas fueron inferiores a 0,2%, y llegaron a un nivel cercano a cero a partir del día tres, probablemente como consecuencia del excedente de H⁺ producto de la nitrificación del NH₄⁺, del agotamiento o de la neutralización de alguna de las fuentes de alcalinidad antes mencionadas.

Sumado a lo anterior, la producción de NH₃ también puede estar reflejando un estímulo de la actividad de los microorganismos que utiliza el N para sus funciones metabólicas. Al

respecto, diversas investigaciones convergen en afirmar que la adición de fertilizantes nitrogenados conduce al aumento en la dinámica de la flora edáfica (17, 25), lo cual revela para este caso en particular, que la cifra del elemento que aparece como volatilizado, es adicionalmente un producto de la mineralización de la materia orgánica. Si se consideran los tres primeros días como críticos, las pérdidas alcanzadas a partir de esta fuente fueron 15 veces menores respecto a la urea.

Pérdidas acumuladas de N. Luego de 30 días, del total de N aplicado a través de la urea, cerca del 28% del mismo pasó a la forma NH₃. Se seleccionó la función para describir el comportamiento de las pérdidas de N para esta fuente (Ecuación <<1>>), la cual corresponde a una expresión de tipo exponencial, con un coeficiente de determinación de 0,86, cuyos parámetros son significativos al 0,01%.

Con base en esta función (Figura 3), y considerando las pérdidas alcanzadas en el día 30 como el 100%, se estima que el 50% de la volatilización ocurre en los primeros tres días, el 90% se presenta hasta el día ocho

$$\text{Volatilización de N (\%)} = 28,4395 (1 - 10^{(-0,2912 \text{ día después de la aplicación})}) \ll 1 \gg$$

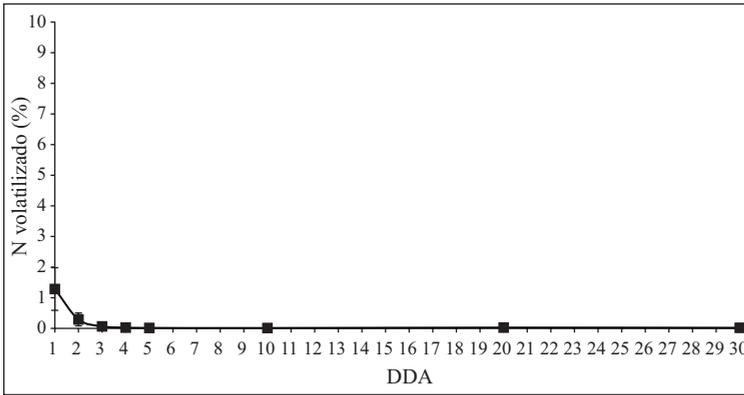


Figura 2. Volatilización de $N-NH_3$ a partir del SAM, durante los 30 primeros días después de su aplicación. Nota: Los valores de volatilización que se presenta a partir del día diez, corresponden al acumulado de los últimos cinco días. Los días 20 y 30 ilustran el acumulado de diez días. Barras verticales indican intervalos de confianza para % N volatilizado con un coeficiente de confianza del 95%.

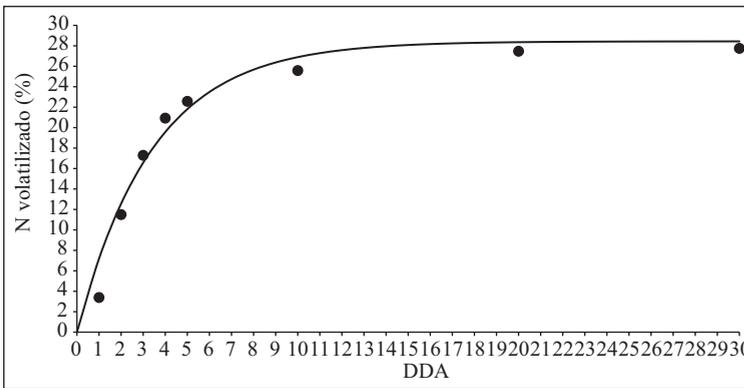


Figura 3. Pérdidas diarias acumuladas de volatilización de $N-NH_3$ desde la urea, a partir de la función de tipo exponencial y valores reales.

y el 95% diez días luego de su aplicación, este último dato coincide con lo registrado por Leal *et al.* (14).

Observaciones previas en las que se ajustaron las épocas y cantidades de los insumos fertilizantes utilizados en el presente experimento, mostraron cómo en un medio edáfico estéril (suelo sometido en autoclave a $125^{\circ}C$ y $103,4\text{ kPa}$ por 20 min), las pérdidas del elemento fueron nulas hasta el día 20 de observación, tiempo a partir del cual se registraron aumentos en los valores de $N-NH_3$ que presuponen la actividad de colonias de microorganismos que aparecieron en el sustrato a partir de esta fecha sobre el

componente orgánico del suelo (Figura 4). Como este fenómeno se presentó también en algunas unidades experimentales 20 días después de aplicar los tratamientos, es posible que la volatilización registrada a partir de esta fecha para las fuentes fertilizantes, haya sido interferida por el N proveniente de la mineralización de la materia orgánica. Lo descrito, sumado a la ocurrencia de las mayores pérdidas de N por volatilización durante los primeros 10 días, sugiere considerar un periodo de evaluación no superior a 20 días.

Si bien, la volatilización generada por efecto de la aplicación superficial de esta fuente presupone la necesidad de buscar

estrategias para mitigar la polución (10) y la reducción de costos de producción, Fenilli *et al.* (3) sostienen que en plantaciones de café sembradas en altas densidades (> 7.000 plantas/ha) es posible que una porción de este $N-NH_3$ se incorpore a las tejidos de las plantas a través de sus hojas.

Para el SAM, el acumulado de pérdidas alcanzó valores de 1,74% (Figura 5), lo cual indica que la volatilización fue 16 veces menor que la urea.

pH residual. Muchos estudios se concentran en hacer seguimiento a los cambios del pH en momentos en los que el fenómeno de pérdidas es más evidente, por ser ésta una variable que condiciona buena parte del proceso, pero no tienen como objetivo estimar los efectos posteriores que pueden ser útiles para una acertada selección de la fuente fertilizante acorde con las características del suelo. En este sentido, transcurridos 30 días, la acidez resultante de la aplicación de las fuentes objeto de estudio, en los primeros 5 cm de profundidad, fue diferente según el

fertilizante aplicado (Figura 6), pese a que el suelo sobre el cual se llevó a cabo el experimento por su naturaleza mineralógica y altos contenidos de materia orgánica exhibe una apreciable capacidad tampón. El incremento registrado por la aplicación de la urea se puede relacionar con la hidrólisis de esta molécula (19) y la reducción a través de SAM, con la nitrificación del amonio (7). Para el caso de la urea, también se hubiera esperado un aumento en la acidez, pero un período de 30 días puede ser muy corto para detectar cambios de este tipo.

Experimento II -Volatilización del N suministrado a partir de la urea y el Sulfammo®. El patrón de pérdidas por volatilización de N a partir de la urea fue similar al registrado para el primer experimento, particularmente en lo que puede denominarse “un momento crítico de volatilización”, entre el segundo y tercer día. No obstante esta similitud, la magnitud de pérdidas fue menor y las condiciones que condujeron a dicha manifestación, pueden estar asociadas con la época de aplicación del fertilizante y



Figura 4. Presencia de colonias de microorganismos en el interior de las trampas de $N-NH_3$ (unidades experimentales) a partir del día 20 de evaluación.

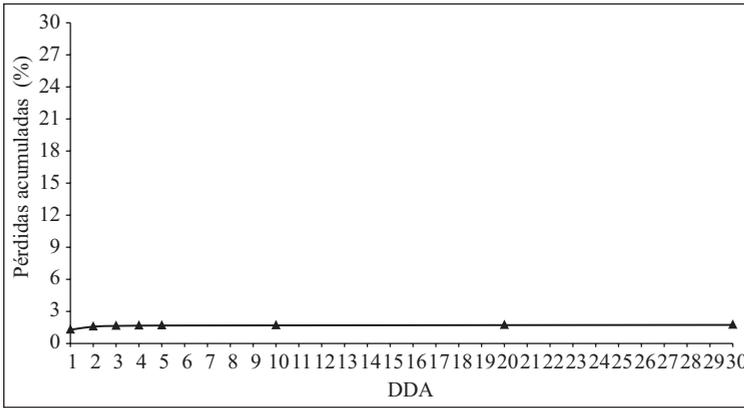


Figura 5. Pérdidas acumuladas de N-NH₃ a partir del SAM.

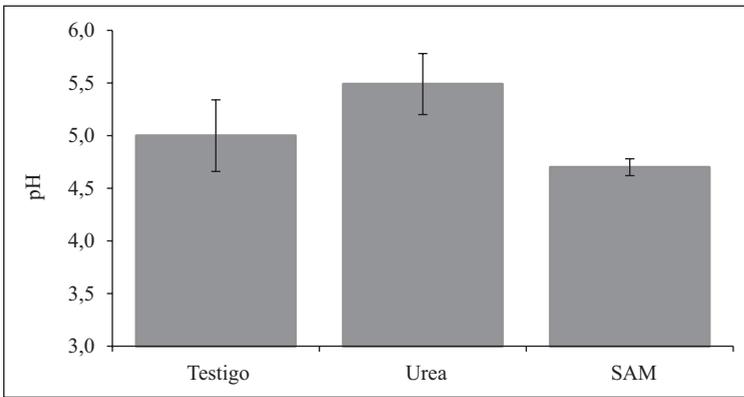


Figura 6. Cambios en el pH consecuencia de los tratamientos evaluados. Barras verticales indican intervalos de confianza con un coeficiente de confianza del 95%.

las variables de tipo ambiental involucradas, como se discutirá más adelante.

Para Sulfammo®, fertilizante que posee el 19% del total de su N en forma ureica, el comportamiento de pérdidas durante los días de mayor volatilización registradas para la urea, fueron 28% y 44% inferiores (Figura 7); circunstancia que puede relacionarse con el efecto de la película de Ca que envuelve sus gránulos, la cual constituyó una barrera para reducir el fenómeno en el corto plazo.

Este mecanismo puede explicarse porque ante el incremento del pH suscitado durante

la transformación bioquímica de la urea, el excedente de iones bicarbonato alcanza a ser neutralizado por el Ca incluido en este recubrimiento, con la subsiguiente generación de CaCO₃ que luego se precipita, tal como lo demuestran Bachmeier *et al.* (2). Al parecer, estas reacciones llegan a su fin una vez se logra conformar el mineral calcáreo, pero queda la duda si los niveles de pH y la concentración de H⁺ y el CO₂ del suelo, conducen casi automáticamente al retorno del ión Ca hacia el medio. Reacciones químicas de este tipo son sustentadas por Lindsay (15).

Con relación al acumulado de pérdidas al cabo de 20 días, luego de aplicar los

fertilizantes, la volatilización fue máximo 21% con la urea, representando una reducción del 35% con relación al experimento I.

Específicamente con el Sulfammo®, el N conducido a la atmósfera por el fenómeno que se discute, fue 43% inferior al de la urea (Figura 8). Esto sugiere que el recubrimiento de los gránulos, sumado a la composición de la fuente fertilizante, en cuya formulación parte del N está en forma ureica y otra proporción como amonio (7%), puede constituir en conjunto una alternativa para mitigar las pérdidas por volatilización. Sobre el tema, Lara y Souza (12) demostraron cómo la mezcla física de urea con SAM granulado, redujo el fenómeno hasta en un 90%. No obstante, es oportuno recalcar que el recubrimiento, visto única y exclusivamente como un agente físico, debe garantizar el desplazamiento del citado elemento hacia la solución del suelo para su posterior aprovechamiento por la planta.

pH residual. Luego de 20 días, el pH se incrementó en 1,0 unidad por la aplicación de la urea y el Sulfammo®, situación que se explica por las reacciones en las que se encuentra involucrada la urea presente en ambas fuentes fertilizantes y que anteriormente fue objeto de análisis (Figura 90). Aunque el Sulfammo® es portador de N en forma de NH_4^+ , la baja concentración de este ión puede inducir poca variación en el pH del suelo.

Variables climáticas. Durante ambos experimentos y en un amplio sentido, la lluvia superó a la evaporación durante la mayor parte del experimento, lo que indica un abastecimiento de la humedad en el suelo para la disolución de los fertilizantes y la actividad de los microorganismos, que potencialmente podrían intervenir en las transformaciones de N.

Para la temperatura, considerada como una variable que condiciona la mineralización

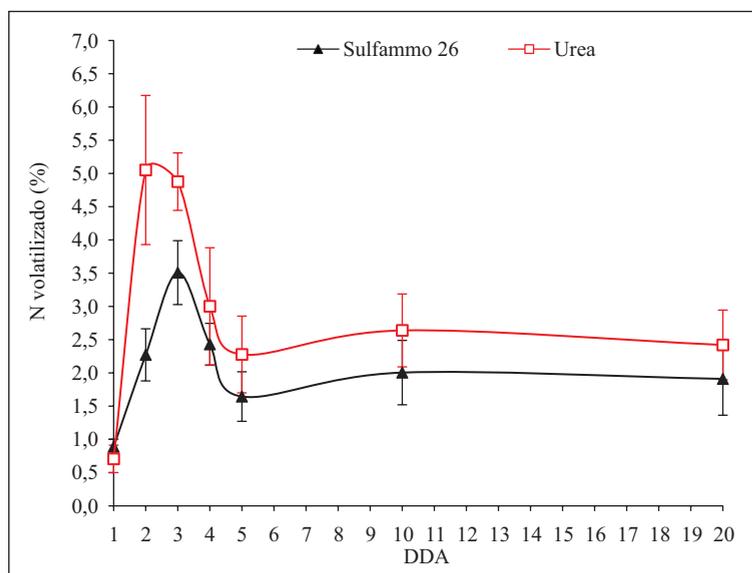


Figura 7. Volatilización de N-NH_3 a partir de la urea y del Sulfammo®, durante los 20 primeros días después de su aplicación (DDA). Los valores de volatilización que se presentan en el día diez, corresponden al acumulado de los últimos cinco días. El día 20 ilustra el acumulado de 10 días. Barras verticales indican intervalos de confianza con un coeficiente del 95%.

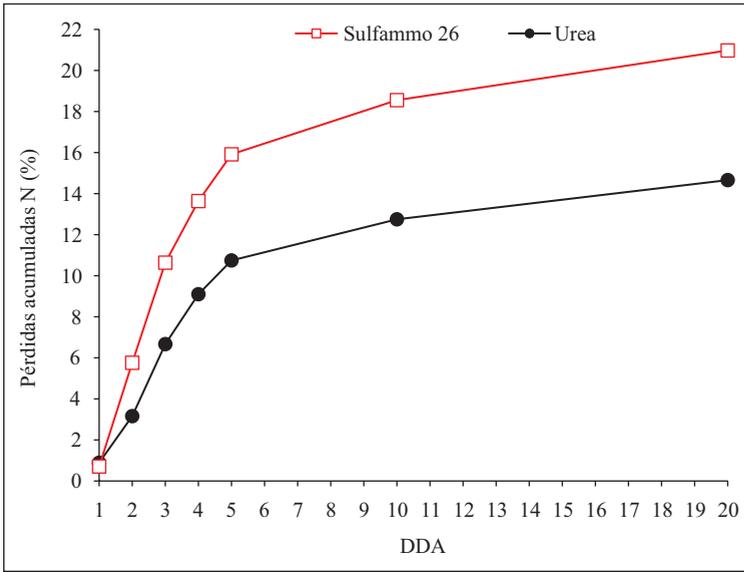


Figura 8. Pérdidas de N acumuladas a partir de la urea y el Sulfammo®.

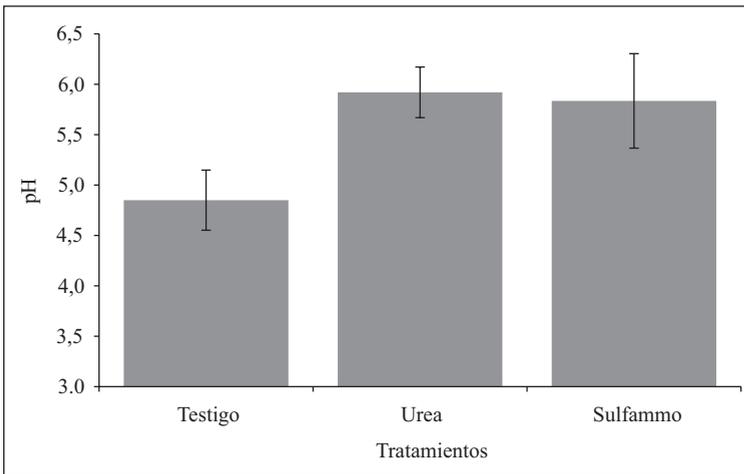


Figura 9. Cambios en el pH consecuencia de los tratamientos evaluados. Barras verticales indican intervalos de confianza para la variable pH, con un coeficiente de confianza del 95%.

de la materia orgánica (5) y la actividad de la ureasa (27), se registraron los siguientes valores promedio para el primer experimento: Máxima 26,2°C, mínima 16,9°C y media de 20,6°C. En tanto que para el segundo hubo muy poca variación al respecto, es decir, 25°C, mínima 17°C y media 20°C.

Leal *et al.* (14) asocian parte de los aumentos en la volatilización del N a partir de la urea a este agente climático, y Lara *et al.* (13), en condiciones diferentes, reportan hasta un 50% de volatilización de N-NH₃ a partir de diferentes fuentes nitrogenadas, en parcelas experimentales, donde la temperatura máxima del aire estuvo por encima de los 30°C.

Bajo este esquema, el rango de valores de las variables climáticas hasta aquí contempladas, pueden no contribuir satisfactoriamente a explicar el fenómeno que se discute. No obstante, al considerar indicadores como la lluvia y la humedad del suelo acumulados 30 días antes de aplicar los tratamientos de experimento y durante los días de máxima volatilización (tres primeros días), pudo observarse que un incremento del 20% en

la lluvia registrada durante el experimento II, condujo a que se presentara un 10% más humedad en el suelo (Figura 11), con lo cual se espera hubiese ocurrido desplazamiento parcial del oxígeno del suelo. Situación que sugiere que la volatilización del N a partir de la urea puede verse afectada más por la humedad del suelo, por ser ésta una molécula dependiente de la actividad de microorganismos para su transformación.

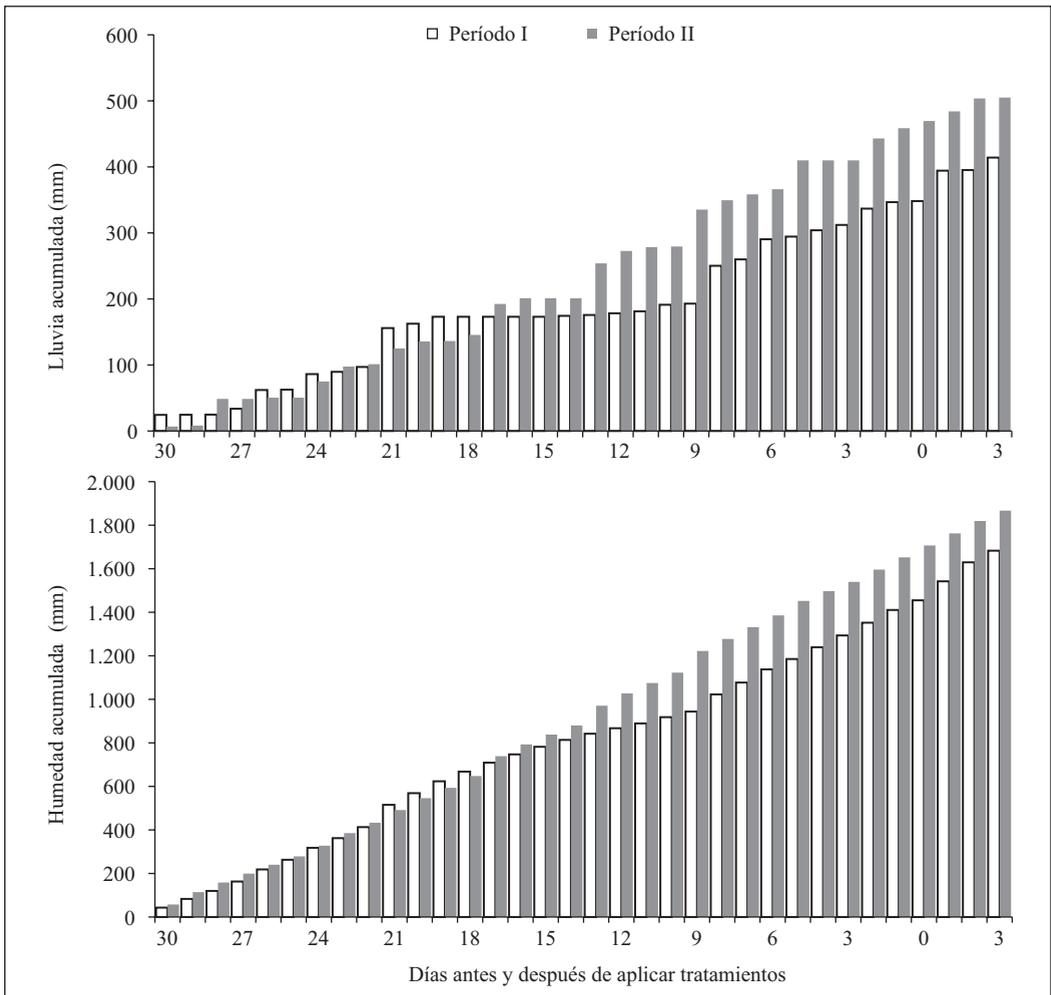


Figura 10. Lluvia y la humedad del suelo acumuladas.

Esto significa que, un bajo nivel de NH_3 detectado puede ser indicador de que en condiciones de alta humedad la eficiencia en la transformación microbiana de la urea puede limitarse o la molécula potencialmente lixivarse en el agua de precolación.

LITERATURA CITADA

- ARCILA P., J. Factores que determinan la productividad del cafetal. p. 61–86. En: ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ : FNC, 2007.
- BACHMEIER K., L.; AMY E., W.; WARMINGTON J., R.; SOOKIE S., B. Urease activity in microbially-induced calcite precipitation. *Journal of biotechnology* 93:171-181. 2002.
- FENILLI, T.A.B.; REICHARDT, K.; TRIVELIN, P.C.O.; FAVARIN, J.L. Volatilization of ammonia derived from fertilizer and its reabsorption by coffee plants. *Communications in soil science and plant analysis* 38(13/14):1741–1751. 2007.
- GONZÁLEZ O., H. El humus en la zona cafetera colombiana: Contenido calidad y su relación con algunas propiedades físicas y químicas del suelo. p. 11-32. En: SCCS. *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola*. Armenia : Sociedad colombiana de la ciencia del suelo : CENICAFÉ, 2009. 36 p.
- GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN K., S. Efecto de corto plazo de distintas fuentes de azufre sobre la acidez y la disponibilidad de este elemento en la zona radical del café (*Coffea arabica* L.). *Cenicafé* 57(2):132–145. 2006.
- GUERRERO R., R. Propiedades generales de los fertilizantes sólidos: Manual técnico. 4a. ed. Bogotá : Monómeros colombo venezolanos, 2004. 46 p.
- HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 6a. ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. 499 p.
- HERRMAN, M.; PUST, J.; POTT, R. Leaching of nitrate and ammonium in heathland and forest ecosystems in northwest germany under influence of enhanced nitrogen deposition. *Plant and soil* 273:129-137. 2009.
- KRAJEWSKAY, B. Ureases functional, catalytic and kinetic properties: A review. *Journal of molecular catalysis B. Enzymatic* 59:9-21. 2009.
- KRUPA, S.V. Effects of atmospheric ammonia (NH_3) on terrestrial vegetation: A review. *Environmental pollution* 124:179-221. 2003.
- LARAC, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Eficiencia de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N– NH_3 volatilizado da uréia aplicacao au solo. *Revista brasileira de ciencia do solo* 14:481-487. 1997.
- LARA C., W.A.R.; SOUZA, M.A. Volatilizacao de amoni, lixivacao de nitrogenio e produtividade de milho em resposta á aplicacao de misturas de ureia com sulfato de amonio ou com gesso agrícola. *Revista brasileira de ciencia do solo* 32:2331–2342. 2008.
- LARA C., W.A.R.; RIVEIRO R., C.; MARTINS DE O., S.; NASCENTES B., E. Utilizacao de ureia em misturas com sulfato de amonio com gesso na cultura de milho. *Revista brasileira ciencia do solo* 32:2343–2353. 2008.
- LEAL V., L.A.; SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Cenicafé* 58(3):216–226. 2007.
- LINDSAY W., L. *Chemical equilibria in soils*. New Jersey : The Blackburn press, 2001. 449 p.
- LIN, D.I.; FAN, X.H.; FENG, H.; ZHAO, H.T.; LUO J., F. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu lake region, China. *Pedosphere* 17(5):639–645. 2007.
- MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; ELLSWORTH, T.R. Reply to comments on “Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil Nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production. *Journal of environmental quality* 39:753-756. 2010.
- NAKAMURA, K.; HARTE, T.; HIRONO, Y.; MITSUNO, T. Assessment of root zone nitrogen leaching as affected by irrigation and nutrient management practices. *Soil science society of America* 3:1353–1366. 2004.
- OSUMANU H., A.; AMINUDDIN, H.; HUSNI M., H.A.; MOHAMADU, B.; JANUAR, A.R.; NICK M., A.M. Enhancing the Urea–N use efficiency in Maize (*Zea mays*) cultivation acid soils using urea amended with Zeolita and TSP. *American journal of applied sciences* 6(5):829–833. 2009.

20. RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A.; ARCILAP, J.; MONTOYA R., E.C. Estimación de la humedad del suelo en cafetales a libre exposición solar. *Cenicafé* 61(3):251-259. 2010.
21. SADEGHIAN K., S. Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. Chinchiná: CENICAFÉ, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 391).
22. SANZ, C.A.; THOMAS H., M.; ARCE, A.; MINGOTM, J.I.; DIEZ, J.A.; VALLEJO, A. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. *Agriculture, ecosystems and environment* 126:243-249. 2008.
23. SUÁREZ C., C. Mercado mundial de fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio. San Andrés: Integración nacional sobre nutrición y fertilización de café, 2008. (Conferencia magistral).
24. TURNER D., A.; EDIS, R.B.; CHEN, D.; FRENEY, J.R.; DENMEAD, J.R.; CHRISTIE, R. Determination and mitigation of ammonia loss from urea applied to winter wheat with N-(n-butyl) thiophosphorictriamide. *Agriculture, ecosystems and environment* 137:261-266. 2010.
25. XU, X.; HAN, L.; LUO, X.; LIU, Z.; HAN, S. Effects of nitrogen addition on dissolved N₂O and CO₂, dissolved organic matter, and inorganic nitrogen in soil solution under a temperate old-growth forest. *Geoderma* 151:370-377. 2009.
26. ZAMAN, M.; SAGGAR, S.; BLENNERHASSETT, J.D.; SINH, J. Effect of urease and nitrification inhibitors on transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil biology and biochemistry* 41:1270-1280. 2009.
27. ZHAI, R.; ZHANG, B.; LUI, L.; XIE, Y.; ZHANG, H.; LIU, J. Immobilization of enzyme biocatalyst on natural halloysite nanotubes. *Catalysis communications* 12:259-263. 2010.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA
GERENCIA TÉCNICA
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Centro Nacional de Investigaciones de Café
“Pedro Uribe Mejía”

DIRECCIÓN

Fernando Gast H., Biólogo Ph.D.
Ángela Liliana Zapata R., Administradora de Empresas M.Sc.

PROGRAMA PRODUCCIÓN Y PRODUCTIVIDAD

Juan Carlos García L., Ing. Agrónomo Ph.D.

PROGRAMA CAFICULTURA Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Néstor Miguel Riaño H., Ing. Agrónomo Ph.D.

DISCIPLINAS DE INVESTIGACIÓN

Calidad

Gloria Inés Puerta Q., Ing. Química, Ing. Alimentos M.Sc.
Claudia Patricia Gallego A., Bacterióloga **
Andrés Mauricio Villegas H., Ing. Agrónomo M.Sc.**
Auberto Quiroga M. Biólogo
Gustavo Echeverri M.
Adriana Milena Vallejo E.
Gerardo de Jesús Ocampo R.

Gestión de Recursos Naturales y Conservación

Nelson Rodríguez V., Ing. Químico Ph.D.
Jorge Eduardo Botero E., Ecológico Ph.D.
Diego Antonio Zambrano F., Ing. Químico
Rocío Espinosa A., Médico Veterinario y Zootecnista
Claudia Rocío Gómez P., Tec. Química
Juan Carlos López N., Microbiólogo **
Andrés Mauricio López L., Médico Veterinario y Zootecnista
José Rafael Rodríguez N., Lic. Biología y Química Esp.
Jennifer Andrea Galeano S., Bióloga
Laura Vanessa Quintero Yepes, Ing. Química
Samuel Antonio Castañeda
Estefanía Vanegas Cárdenas, Aprendiz Universitario

Fisiología vegetal

Claudia Patricia Flórez R., Ing. Agrónomo Ph.D.
Aristóteles Ortiz, Químico**
Jenny Lorena Aguirre M., Ing. de Alimentos
Claudia Yoana Carmona G., Ing. Agrónomo
Luz Fanny Echeverry G., Química
Marta Bibiana Escobar P., Tec. Químico
Lizardo Norbey Ibarra R., Ing. Agrónomo
Mauricio Serna O., Ing. Electrónico
Carlos Andrés Unigarro M., Ing. Agrónomo M.Sc.
Humberto Iván Ríos., Ingeniero Ambiental Esp.
Óscar Gonzalo Castillo R., Ing. Catastral y Geodesta M.Sc.
Yulieth Paola Giraldo E. Ing. de Sistemas y Telecom Esp.
Juan David Hernández Arredondo, Ing. Agrónomo M.Sc.
Claudia Marcela Mora Agudelo
Mario Franco A.

Braian Alejandro López O.
Claudia Patricia Valencia V.
José Robín García C.

Suelos

Siavosh Sadeghian K., Ing. Agrónomo Ph.D.
Hernán González O., Ing. Agrónomo M.Sc.*
Luis Fernando Salazar G., Ing. Agrónomo M.Sc.*
José Horacio Rivera P., Ing. Agrónomo Ph.D.
Luz Adriana Lince S., Ing. Agrónomo, Geóloga**
Alveiro Salamanca J., Ing. Agrónomo*
Vanessa Catalina Díaz P., Química
Janeth Escudero A., Microbióloga Industrial y Ambiental
Fabio Alexis Torres Angarita, Ing. Agrónomo Esp.
Arturo Gómez V.

Fitotecnia

Francisco Fernando Farfán V., Ing. Agrónomo M.Sc.
José Raúl Rendón Sáenz, Ing. Agrónomo M.Sc.
Carlos Augusto Ramírez C., Tec. Técnicas Forestales
Leidy Tatiana Bermúdez F., Ing. Agrónomo
Nathalia Díaz Mejía, Ing. Agrónomo
José Rubiel Castrillón G, Ing. Sistemas y Telecom.

Mejoramiento Genético

Hernando Alfonso Cortina G., Ing. Agrónomo M.Sc.
José Ricardo Acuña Z., Biólogo Ph.D.
Juan Carlos Herrera P., Biólogo Ph.D.
María del Pilar Moncada B., Ing. Agrónomo Ph.D.
Diana María Molina V., Bacterióloga Ph.D.
Carlos Ernesto Maldonado L., Ing. Agrónomo M.Sc.*
Jefferson Medina O., Biólogo**
Alexa Yadira Morales C., Bióloga
Ligia Belén Suescún P., Ing. de Prod. Biotecnológica
Mónica Quintero M., Ing. Biológica **
Conrado Antonio Quintero D., Administrador Financiero
Carlos Augusto Vera A., Administrador Financiero
Jairo Jaramillo O., Tec. en Electrónica
Andrea Valencia O., Bióloga
Luis Enrique Chanchí A.
Hernán Díaz C.
Cruz Elena Díaz M.
Omar Villarreal
Sandra Liliana Largo V.

Entomología

Pablo Benavides M., Ing. Agrónomo Ph.D.
Carmenza E. Góngora B., Microbióloga Ph.D.
Zulma Nancy Gil P., Ing. Agrónomo Ph.D.
Luis Miguel Constantino C., Biólogo Entomólogo M.Sc.
Marisol Giraldo J., Ing. Agrónomo M.Sc.*
Flor Edith Acevedo B., Ing. Agrónomo*
Aníbal Arcila M., Ing. Agrónomo
Mauricio Jiménez Q., Tec. Administración Agropecuaria
Lucio Navarro E., Biólogo*

Juan Paulo Pimentel S., Tec. Adm. Empresas Agropecuarias
Juan Carlos Ortiz F.
Carlos Alberto Quintero A.
Diana Soraya Rodríguez A., Téc. en Producción de Café
Claudia Bibiana Tabares B.
Faber de Los Ríos P.
Diana Marcela Giraldo V.

Agroclimatología

Andrés Javier Peña Q., Ing. Agrónomo M.Sc.
Carolina Ramírez C., Ing. Agrícola
Wilmar A. Rendón G., Tec. en Sistemas Informáticos
Myriam Giraldo M.
Luis Gonzaga Henao R.
Fabián Sánchez L.
Luis Fernando Torres Q.
Jorge Hernán Marulanda E., Tec. en Electrónica
Orlando Salazar G.

Fitopatología

Álvaro León Gaitán B., Microbiólogo Ph.D.
Marco Aurelio Cristancho A., Microbiólogo Ph.D.
Juan Manuel López Vásquez, Ing. Agrónomo, M.Sc.
Alejandra María Hoyos G. Ing. Agrónomo
Carlos Alberto Zuluaga E., Tec. en Mantenimiento en Comp. y Redes
Carlos Arturo González V.
Jorge Dicksson Ocampo M.
Jaroliver Cardona G.
Juan Carlos López C.

Sostenibilidad

Juan Mauricio Rojas A., Ing. Alimentos M.Sc.
Gloria Esperanza Aristizábal V., Lic. Bióloga y Química M.Sc.
María Cristina Chaparro C., Química M.Sc.
Janeth Alexandra Zuluaga M., Economista Empresarial M.Sc.
Montserrat Dayana Prieto Muñoz, Ing. Agrónoma Esp.
Paola Andrea Espejo G. Antropóloga **
Mario López L.
Daniela Gaviria H., Aprendiz
Cristian Giraldo Q., Aprendiz

Ingeniería agrícola

Carlos Eugenio Oliveros T., Ing. Agrícola Ph.D.
Juan Rodrigo Sanz U., Ing. Mecánico Ph.D.
César Augusto Ramírez G., Arquitecto M.Sc.
Aída Esther Peñuela M., Ing. Alimentos M.Sc.*
Paula Jimena Ramos G., Ing. Electrónico M.Sc.**
Ricardo José Grisales M., Tec. en Electrónica
José Farid López D., Tec. en Administración Agropecuaria
Javier Arias H.
Mario Espinosa G.
Javier Velásquez H.

EXPERIMENTACIÓN

Carlos Gonzalo Mejía M., Admr de Empresas Agropecuarias M.Sc.
Kelly Johana Correa A., Prof. en Adm. de Mercadeo

Estación Central Naranja

Jhon Félix Trejos P., Ing. Agrónomo

Estación Experimental El Tambo

Hernán Darío Menza F., Ing. Agrónomo M.Sc.

Estación Experimental El Rosario

Carlos Mario Ospina P., Ing. Forestal**

Estación Experimental La Catalina

Diego Fabián Montoya, Agrónomo
Francisco Javier Álzate O.
Vidal de Jesús Largo T.

Estación Experimental Libano

Jorge Camilo Torres N., Ing. Agrónomo

Estación Experimental Paraguacito

Myriam Cañón H., Ing. Agrónomo **
Daniel Antonio Franco C., Tec. en Gestión Agropecuaria **

Estación Experimental Pueblo Bello

José Enrique Baute B., Ing. Agrónomo

Estación Experimental Santander

Pedro María Sánchez A., Ing. Agrónomo
Melsar Danilo Santamaría B., Ing. de Alimentos

APOYO A LA INVESTIGACIÓN

Biometría

Esther Cecilia Montoya R., Estadístico M.Sc.
Rubén Darío Medina R., Estadístico M.Sc.
Hernando García O., Técnico en Mantenimiento Eléctrico**

Documentación

Alma Patricia Henao T., Lic. en Lenguas Modernas,
Bibliotecóloga, Esp.
Nancy Elena Pérez M., Contador Público
Jorge Wilmar Valencia G. Tec. en Análisis y Desarrollo de
Sistemas de Información

Economía

César Alberto Serna G., Contador, M.Sc.

Divulgación y Transferencia

Sandra Milena Marín L., Ing. Agrónomo M.Sc.
Carmenza Bacca R., Diseñadora Visual
Jair Montoya T., Administrador de Empresas M.Sc.
Óscar Jaime Loaiza E., Diseñador Visual
Luz Adriana Álvarez M., Diseñadora Visual
Paula Andrea Salgado V., Administrador Financiero
Luis Fernando Castaño C. Aprendiz

UNIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA

Luz Miryam Corredor R., Administradora de Empresas,
Contador Público, Esp.
Rufina Perdomo G.

Gestión Contable y Tributaria

Martha Elena Vélez H., Contador Público Esp.
Jesús Danilo González O., Contador Esp.
María Consuelo González H.

Gestión de Bienes y Servicios Mantenimiento

Óscar Fernando Ramírez C., Ing. Mecatrónica**
Cristian David Sabogal E., Ing Electrónico y Electricista
Gabriel Hernando Ortiz C., Tec. en Gestión Bancaria y
Financiera
Uriel López P.
José Asdrúbal Muñoz
Rogelio Rodríguez G.
Javier Vanegas V.

Eduardo Villegas A.
Fredy Hernán Osorio C.
Mauricio Alexander Erazo S. Técnico Electricista
Andrés Julián Rendón O., Aprendiz Universitario

Gestión de Tesorería

Luis Fernando Ospina A., Contador Público, Esp.

Gestión del Talento Humano

Érica Mayerly Galvis R., Trabajadora Social M.Sc.
Luz Yaneth Guarín C., Tec. Administración de Negocios
Germán Uriel G., Administrador de Empresas, Esp.
Elsa Natalia Quintero C., Profesional en Salud Ocupacional Esp.**

Planeación Financiera y Presupuesto

Jesús Alberto Cardona L. Ing. Industrial M.Sc.
Damaris Márquez G., Administradora Financiera**
Federico Giraldo D., Administrador de Empresas

Gestión de Bienes y Servicios Contratación

Juan David Álzate Ocampo, Economista, M.Sc.

Mauricio Loaiza M., Ing. Industrial
Luz Stella Duque C., Tec. en Administración de Negocios
Ángela Jaramillo G., Prof. en Comercio Internacional**
Luis Alfredo Amaya F., Administrador Público
Yolanda Castaño G.
Gabriel Antonio Melo P.
Juan Pablo Jaramillo B., Técnico en Fotografía
Lina María Giraldo, Tec. Asistente Administrativo**
Karen Osorio V., Aprendiz
Danny Alejandro Pineda G., Aprendiz

Tecnología de la Información y Comunicaciones

Luis Ignacio Estrada H., Ing. Químico
Carlos Hernán Gallego Z., Ing. de Sistemas, Esp.**
Luz Ángela Fernández R., Licenciada en Psicopedagogía
Elkin Marcelo Valencia L., Ingeniero de Sistemas**
Arley Valencia S., Ingeniero Electrónico**
Daniel Orozco J., Ing. Sistemas y Telecom. Esp.
Leonardo Adolfo Velásquez N., Ing. de Sistemas y Telecom. Esp.
Kevin Adolfo Hincapié V., Ing. de Sistemas y Telecom. Esp.
Andrés Felipe Ramírez M., Ing. Sistemas y Telecom.

*Comisión de Estudios

** Adelantando estudios en el país

Instructivo para la elaboración de los artículos de la Revista Cenicafé

TEXTOS

- Digite los textos, no los diame
- Cuando cite la palabra Cenicafé, escriba la primera letra en mayúscula y las siguientes en minúsculas
- Los nombres científicos se escriben en letra itálica o cursiva; la primera letra debe ir en mayúscula, ejemplo: *Beauveria bassiana*
- Las palabras *et al.*, *in vitro* y cualquier otra locución latina se escriben en letra itálica o cursiva
- El estilo de escritura debe ser absolutamente impersonal, en tiempo gramatical pasado, evitando la conjugación de verbos en primera o tercera persona del singular o el plural
- Las ecuaciones deben nombrarse y enumerarse mediante el siguiente modelo matemático <>:
 $A = R \times K \times S \times L \times C \times P <1>$
- Si se emplean siglas y abreviaturas poco conocidas, se indicará su significado la primera vez que se mencionen en el texto y en las demás menciones bastará con la sigla o abreviatura
- Evite al máximo el uso de nuevas siglas poco conocidas

TABLAS Y FIGURAS

- Elabore las tablas en el formato de tabla de word o de excel
- No las incluya en el documento como fotos o imágenes
- Las cifras decimales sepárelas con una coma, no con punto
- Las tablas deben titularse en la parte superior y al enunciarla en el texto, la palabra se debe escribir con la primera letra en mayúscula, ejemplo: Tabla 10
- Las tablas deben crearse en blanco y negro
- Como norma general, las figuras deben titularse en la parte inferior, y cuando enuncie la figura en el texto, la palabra se debe escribir con la primera letra en mayúscula, ejemplo: Figura 10
- Las fotografías se deben tomar con el mayor tamaño (número de píxeles) y la mejor calidad (Fine) posibles, ya que esto asegura mejores impresiones de informes, pósteres o publicaciones
- Las fotografías deben nombrarse con el autor y su descripción
- Las tablas y figuras deben presentarse en archivos independientes y con numeración consecutiva (Tabla 1... Tabla n; Figura 1... Figura n, etc.)
- Los textos y tablas deben presentarse en el procesador de palabra Word
- Las tablas y los diagramas de frecuencia (barras y torta) originales deben suministrarse en el archivo del manuscrito y también en su original de Excel
- Otras figuras, como fotografías sobre papel y dibujos, se pueden enviar en originales o escanearlas y remitirlas en el formato digital de compresión JPG, preferiblemente con una resolución de 600 x 600 dpi (mínimo 300 dpi)

ECUACIONES

- Use una sola letra para denotar una variable y emplee subíndices para particularizar
- Para las variables utilice letra itálica
- El producto no se denota con *. Use solamente espacios
- Las matrices y vectores se denotan con letra en negrilla e itálica

SISTEMA DE UNIDADES

- En los productos de investigación a divulgar se utiliza exclusivamente el Sistema Métrico Decimal (SI), además de las unidades específicas de mayor uso por parte de la comunidad científica.
- Los puntos de multiplicación y los números superíndice negativos pueden ser usados solamente con unidades del SI (por ejemplo, $m^3 \cdot s^{-1}$ y no m^3s^{-1} , que podría indicar milisegundos).

- No se debe interrumpir la notación de unidades del SI con símbolos que no corresponden a unidades del sistema internacional ni con palabras diferentes, porque las unidades son expresiones matemáticas. Reordene la frase apropiadamente, por ejemplo así:
 - _ El rendimiento en peso seco fue de 5 g.día⁻¹, y no 5 g de peso seco.día⁻¹
 - _ Se aplicaron 25 g.ha⁻¹ del ingrediente activo, y no 25 g i.a./ha
 - _ Cada planta recibió 20 g.ha⁻¹ de agua, y no 20 g H₂O/ha por planta
- Use la línea oblicua o *slash* (/) para conectar unidades del SI con unidades que no son del SI (por ejemplo: 10 °C/h ó 10 L/materia)
- Nunca use el punto elevado (.) y el *slash* en la misma expresión. Si se hallan mezcladas unidades del SI con unidades que no son del SI, use primero el slash y luego la palabra 'por' en segundo término.
- Nunca utilice dos o más líneas oblicuas o *slashes* (/) o la palabra 'por' más que una vez en la misma frase, pues estos dos términos son equivalentes; por ejemplo en cepilladas/día por planta, redacte la frase así: cada planta fue cepillada dos veces al día. Para unidades totalmente verbales, use un slash, como en 3 flores/planta ó 10 frutos/rama
- Use la misma abreviatura o símbolo para las formas en singular o plural de una unidad determinada (por ejemplo, 1 kg y 25 kg). Deje un espacio entre el valor numérico y el símbolo (por ejemplo, 35 g y no 35g). En una serie de medidas ponga la unidad al final (excepto para el signo de porcentaje) así: entre 14 y 20°C o hileras a 3, 6 y 9 m, pero 14%, 16% y 18%
- En las publicaciones se emplea la coma (,) para separar decimales y el punto (.), para separar miles y millones

BIBLIOGRAFÍA

Antes de enviar las propuestas de publicaciones tenga en cuenta los siguientes modelos para citar las bibliografías, de acuerdo con los criterios determinados por el Comité Editorial de Cenicafé.

Libros, folletos y monografías

- Autor(es) . Título : Subtítulo. No. de edición. Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs.

Partes o capítulo de un libro

- Autor(es) del capítulo o parte. Título del capítulo o parte : Subtítulo. Paginación de la parte citada. En: Compilador(es) o editor(es) del trabajo general . Título del trabajo general: Subtítulo. No. de edición. Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs. del libro.

Ponencias

- Autor(es) ponencia, congreso, etc . Título de la ponencia, etc. : Subtítulo. Paginación de la parte citada. En: Título oficial del congreso, simposio, etc . (No. arábigo correspondiente al congreso : fecha y año de realización : ciudad donde se realizó). Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs.

Trabajos de grado

- Autor(es) del trabajo. Título : Subtítulo. Ciudad : Institución universitaria que otorga el título. Facultad o Escuela, Fecha. No. total de págs. Trabajo de grado: título recibido.

Congresos, Seminarios, Simposios

- Nombre del congreso en mayúscula sostenida la primera palabra : Memorias, Actas, Procedimientos, etc. (No. Arábigo correspondiente al congreso : fecha y año de realización : ciudad donde se realizó). Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs.

Artículos de revistas

- Autor(es) . Título del artículo : Subtítulo . Título de la revista. Volumen(número):Pág. inicial-pág.final del artículo. Año

Separatas y reimpresos

- Autor(es). Título de la separata : Subtítulo. En: Título de la publicación de la cual se extrae la separata Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha) si es un libro, o, Volumen y/o número si es una revista Año. (separata). No. Total de págs.

Boletines y Publicaciones en serie

- Autor(es) . Título : Subtítulo . Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). No. total de págs. (Avances Técnicos, Boletín Técnico, Circular, etc. No. 00).

Normas

- Autor(es). Título : Subtítulo. Pie de imprenta (Ciudad : Editorial, Fecha). (NTC 000). No. de págs.

Documentos electrónicos

- Autor(es). Título : Subtítulo. [En línea]. Lugar de publicación : Publicador, fecha. Disponible en internet: <http://www. ...> . Parte de un documento electrónico o registro de base de datos Consultado el ...Fecha de la consulta.

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO

El artículo postulado para su publicación debe ser original o inédito, y de igual manera no puede estar postulado para su publicación en otras revistas

Título – Máximo 16 palabras

- Que sea breve y preciso
- Que identifique el aporte del estudio, es decir, hágalo interesante pero preciso.
- Si se incluye el nombre común o el binomial (científico) de una especie en el título, utilice uno de los dos pero nunca ambos.
- No prometa más de lo que va a entregar
- Evite el uso de subtítulos
- Evite abreviaturas, paréntesis, fórmulas, caracteres desconocidos
- Nombre del (los) autor (es)
- Se debe incluir la profesión y demás títulos obtenidos
- Si el autor o alguno de los autores ya no se encuentra trabajando en Cenicafe, se debe incluir la fecha de retiro (mes y año)

Resumen – Máximo 250 palabras

- El resumen debe señalar de manera concisa los objetivos, resultados y conclusiones del estudio.
- No debe contener referencias bibliográficas
- Su contenido se debe entender sin tener que recurrir al texto, tablas y figuras
- Al final del resumen deben incluirse de 3 a 6 palabras claves que describan los tópicos más importantes del trabajo, con el fin de facilitar la inclusión en los índices internacionales; las palabras claves no deben estar incluidas en el título

Abstract - Máximo 250 palabras

- Es la versión del resumen traducida al inglés. Debe ser preparado por el autor y debe incluirse

Introducción - Máximo 1.000 palabras

Debe incluir:

- La naturaleza del problema, de manera concisa
- El estado del problema (revisión de literatura)
- Solo deben citarse las referencias estrictamente pertinentes
- No debe incluir datos, ni conclusiones del trabajo
- El propósito de la investigación

Materiales y métodos - Máximo 1.100 palabras

Debe escribirse de tal manera que un investigador con conocimiento del tema pueda repetirlo, que informe al lector cómo fue realizado el estudio y proporcione suficiente información para interpretarlo y evaluarlo. Esté seguro de no omitir información que pueda afectar la interpretación de los resultados, es decir:

- Describa las condiciones experimentales, precisa y concisamente
- Los detalles del medio ambiente, especímenes, técnicas, materiales y equipos deben considerarse en esta sección del artículo
- Haga énfasis en hechos que sean nuevos
- No entre en detalle cuando se trate de métodos estandarizados de investigación
- Use citas de literatura si son pertinentes
- Si un método estándar ya publicado ha sido modificado, describa la naturaleza de los cambios
- Describa los métodos en la secuencia que va a describir los resultados
- La primera vez que mencione un nombre científico utilice el binomial con el clasificador, ejemplo: *Coffea arabica* L.; de allí en adelante sólo use el género abreviado y escriba la especie, ejemplo: *C. arabica*
- Siempre use el tiempo pasado
- Defina técnicamente las variables y cómo se obtienen
- Describa el diseño experimental o soporte estadístico, de acuerdo con el tipo de investigación
- Describa el análisis de la información
- Describa los criterios de decisión

Resultados y discusión – Máximo 2.500 palabras

En este capítulo se presentan los análisis y la interpretación de los datos obtenidos en la investigación, discutidos según los resultados anteriores. Como guías deben tenerse en cuenta las siguientes:

- Presente los datos en la secuencia abordada en la metodología
- Use tablas o figuras (ilustraciones y gráficas)
- No repita los datos en distintas formas. O están en figuras o en las tablas o en el texto
- Si el contenido total de la tabla puede ser descrito con claridad en el texto, no la presente. La tabla debe contener, al menos una medida de tendencia central, una medida de dispersión o intervalo de confianza, si requiere la prueba de comparación estadística. Al pie de la tabla indicar la prueba de comparación, con su nivel de significación y la descripción de las abreviaturas utilizadas en ella
- Utilice la figura para ilustrar en forma rápida un resultado complejo
- En el caso de ilustrar promedios, utilice los intervalos de confianza. No incluya en las figuras los datos de promedios ni las letras asociadas a la prueba de comparación
- En una misma figura no incluya dos variables dependientes diferentes. Utilice correctamente el plano cartesiano
- Las descripciones de figuras y tablas deben contener la información suficiente para entender los resultados descritos en ellas, sin tener que acudir al texto
- El mensaje central debe ser suficientemente claro
- Indique la aplicación de los resultados
- Interprete los resultados
- Discuta hechos controversiales con objetividad
- Permitale al lector seguir su línea de pensamiento
- Identifique resultados que abran nuevas posibilidades de estudio
- No se sienta obligado a escribir una explicación positiva para cada faceta del estudio
- Nunca utilice “se necesita hacer más trabajo. . .”
- No haga discusión trivial

Agradecimientos – Máximo 70 palabras

Con esta sección se pretende abrir un espacio lo suficientemente notable para que se tengan en cuenta las personas que con sus aportes colaboraron a guiar o desarrollar las investigaciones o a redactar y revisar el manuscrito que se somete a consideración, y que de no existir una sección como ésta, el autor en ocasiones se ve forzado a considerarlas como coautoras del artículo. Además, debe incluir la fuente de financiación de la investigación que originó el artículo, como el código de la misma

Literatura citada

- Se deben colocar en esta Sección sólo las referencias citadas
- No más de 50 citas bibliográficas
- La literatura se debe organizar en estricto orden alfabético y se debe enumerar siguiendo un orden ascendente Las referencias deben citarse en el texto utilizando el número correspondiente al orden alfabético

Diseño y
Diagramación: Óscar Jaime Loaiza E.

Fotografías: Archivo Cenicafé

Impresión: Javegraf

1.200 ejemplares

Para canjes con esta publicacion dirigirse a:
Centro de Documentación
Centro Nacional de Investigaciones de Café
Cenicafé
Manizales - Caldas - Colombia



Cenicafé

Al servicio de los caficultores colombianos, desde 1938

www.cenicafe.org