

Cenicafé

Revista del
Centro Nacional de Investigaciones de Café



Volumen 64 Número 2

Julio - Diciembre 2013



**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

Período 1° enero/2015- diciembre 31/2018

Jose Fernando Montoya Ortega

Jose Alirio Barreto Buitrago

Eugenio Velez Uribe

Danilo Reinaldo Vivas Ramos

Crispín Maria Villazon De Armas

Javier Bohorquez Bohorquez

Octavio Oliveros Collazos

Edilberto Rafael Alvarez Pineda

Leonardo Javier Pabón Sanchez

Alfredo Yañez Carvajal

Carlos Alberto Cardona Cardona

Alejandro Corrales Escobar

Jorge Julian Santos Orduña

Luis Javier Trujillo Buitrago

Camilo Restrepo Osorio

Gerente General

LUIS GENARO MUÑOZ ORTEGA

Gerente Administrativo

LUIS FELIPE ACERO LÓPEZ

Gerente Financiero

JULIÁN MEDINA MORA

Gerente Comercial

CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ

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 2015
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. 64

JULIO - DICIEMBRE 2013

No. 2

CONTENIDO

BALANCE DE ENERGÍA BASADO EN LA CONTABILIDAD DEL CARBONO EN TRES SISTEMAS PRODUCTIVOS CAFETEROS. Jhon Jaime Arias H.; Néstor Miguel Riaño Herrera; Manuel Aristizábal Loaiza7

ENERGY BALANCE BASED ON CARBON COUNTS IN THREE COFFEE SYSTEMS

EFFECTO DEL NIVEL DE INTROGRESIÓN Y DEL AMBIENTE SOBRE LA POLINIZACIÓN EN CRUZAMIENTOS CONTROLADOS DE CAFÉ. Juan Carlos Herrera P.; Laura F Gonzales.....17

EFFECT OF INTROGRESION LEVELS AND THE ENVIRONMENT ON THE POLLINATION IN COFFEE CONTROLLED CROSSINGS

ESTUDIO DE LA DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y MOLECULAR DEL GERMOPLASMA DE *Coffea liberica* BULL EX HIERN EN COLOMBIA. Ifigenia Hurtado; Juan Carlos Herrera Pinilla31

STUDY ON THE MORPHOLOGICAL AND MOLECULAR DIVERSITY OF *Coffea liberica* BULL EX HIERN GERMOPLASM IN COLOMBIA

EVALUACIÓN FÍSICA DE LAS APLICACIONES CON DIFERENTES EQUIPOS DE ASPERSIÓN PARA EL MANEJO DE LA BROCA. Diego Fabián Montoya, Diógenes Villalba Guott48

PHYSICAL EVALUATION OF SPRAYING SYSTEMS FOR THE CONTROL OF THE COFFEE BERRY BORER

INFLUENCIA DEL SISTEMA RADICAL DE CUATRO ESPECIES VEGETALES EN LA ESTABILIDAD DE LADERAS A MOVIMIENTOS MASALES. Jorge Enrique Barrera Gutiérrez; José Horacio Rivera Posada; Miguel Eugenio Cadena Romero59

ROOT SYSTEM INFLUENCE OF FOUR BOTANICAL SPECIES IN THE HILLSIDE STABILITY AGAINST MASSAL MOVEMENTS

PRODUCCIÓN DE ALCOHOL A PARTIR DE LA PULPA DE CAFÉ. Nelson Rodríguez Valencia ...78

ALCOHOL PRODUCTION FROM COFFEE PULP

COMITÉ EDITORIAL

Fernando Gast H.	PhD. Director, Cenicafé
Pablo Benavides M.	PhD. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé
Juan Rodrigo Sanz U.	PhD. Ing. Mecánico. Ingeniería Agrícola, Cenicafé
Carmenza E. Góngora B.	PhD. Microbióloga. Entomología, Cenicafé
José Ricardo Acuña S.	PhD. Microbiólogo. Mejoramiento Genético, Cenicafé
Siavosh Sadeghian K.	PhD. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé
Sandra Milena Marín L.	MSc. Ing. Agrónomo. Divulgación y Transferencia, Cenicafé

EDITORES ESPECIALIZADOS DE LA REVISTA 64 (2)

Juan Rodrigo Sanz U.	PhD. Cenicafé, FNC
Marco A. Cristancho A.	PhD. Cenicafé, FNC
Zulma N. Gil P.	PhD. Cenicafé, FNC
Édgar HincapiéG.	Ph.D. Cenicafé

BALANCE DE ENERGÍA BASADO EN LA CONTABILIDAD DEL CARBONO EN TRES SISTEMAS PRODUCTIVOS CAFETEROS

Jhon Jaime Arias Hernández*; Néstor Miguel Riaño Herrera**; Manuel Aristizábal Loaiza***

ARIAS H., J.J.; RIAÑO H., N.M.; ARISTIZÁBAL L., M. Balance de energía basado en la contabilidad del carbono en tres sistemas productivos cafeteros. Revista Cenicafé 64(2): 7-16. 2013

En esta investigación se estableció la metodología para realizar el balance de energía basado en la contabilidad del carbono visualizado a través de las fijaciones y emisiones de dióxido de carbono para tres sistemas de productivos cafeteros. El trabajo se realizó en áreas seleccionadas de los departamentos del Valle del Cauca y Quindío (Colombia). Los sistemas evaluados fueron café, *Coffea arabica* L. con plátano (*Mussa AAB*), café con guamo (*Inga edulis*) y café a libre exposición solar. Se utilizó la cubicación como principal herramienta de medición (método destructivo de evaluación), se determinó individualmente la biomasa fresca por planta, además del porcentaje de materia seca. A partir de los resultados obtenidos de biomasa se generaron modelos no lineales con el tiempo térmico. Los resultados indican que el sistema café con plátano puede llegar a alcanzar valores excedentarios de 194,2 t de CO₂eq por hectárea. En general, se desarrolló una metodología de balances de energía, con la cual se puede cuantificar el potencial de almacenamiento de carbono de los sistemas productivos cafeteros.

Palabras clave: *Coffea arabica*, *Mussa AAB*, *Inga edulis*, carbono equivalente, biomasa, cubicación.

ENERGY BALANCE BASED ON CARBON COUNTS IN THREE COFFEE SYSTEMS

This research established the methodology for energy balance based on visualized carbon accounting through carbon dioxide fixations and emissions and for three coffee production systems. The research was carried out in selected areas of the departments of Valle del Cauca and Quindío (Colombia). The systems evaluated were coffee, *Coffea arabica* L. with plantain (*Mussa AAB*), coffee with guamo trees (*Inga edulis*) and coffee exposed to direct sunlight. Cubication was used as the primary measurement tool (destructive method of evaluation), fresh biomass per plant and the percentage of dry matter were determined individually. The results from biomass were the basis to generate nonlinear models with thermal time. The results indicate that the coffee with plantain system can reach surplus values of 194.2 tons of CO₂eq per hectare. In general, an energy balance methodology useful to quantify the potential of carbon storage of coffee production systems was developed.

Keywords: *Coffea arabica*, *Mussa AAB*, *Inga edulis*, carbon equivalent, biomass, cubication.

* Investigador Asociado (hasta el 31 de diciembre de 2011), Disciplina de Fisiología, Cenicafé

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

*** Ingeniero Agrónomo. M.Sc. Profesor titular Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Caldas. Manizales, Caldas, Colombia.

El medio ambiente ha estado en el primer plano de la opinión internacional en los últimos cinco quinquenios, y particularmente a partir de 1972, cuando se manifestó la preocupación por el calentamiento de la Tierra a través de diferentes fenómenos ambientales (huracanes, maremotos, tornados y terremotos, entre otros); dicho fenómeno ha venido siendo estudiado por diferentes entidades en el mundo como el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), creado en 1988 con el objetivo de evaluar el riesgo originado por la actividades humanas, y que también ha instaurado compromisos orientados a la conservación de nuestro planeta (4).

Los estudios realizados llevan a un tema claramente descrito como es la acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), señalados como la causa principal del problema. En este sentido, el calentamiento global se relaciona con causas antropogénicas como el efecto de la industrialización, la contaminación humana, el uso de combustibles fósiles y con la tala de bosques (4).

El almacenamiento y la fijación de carbono es uno de los servicios ambientales de los ecosistemas forestales y agroforestales más relevantes. La fijación de carbono se genera durante el proceso de fotosíntesis realizado por las hojas y otras partes verdes de las plantas, que capturan el CO_2 de la atmósfera y producen carbohidratos, liberan oxígeno y carbohidratos que se utilizan para formar la biomasa de la planta. En ese sentido, los bosques tropicales, las plantaciones forestales, los sistemas agroforestales y, en general, aquellas actividades que llevan a la ampliación de una cobertura vegetal permanente, pueden cumplir la función de "sumideros de carbono" (9).

La estimación de la biomasa en plantaciones es un tema relevante en relación con el calentamiento global del planeta. En años recientes se ha incrementado el interés por estudiar el papel de los cultivos y bosques y su relación con los gases de efecto invernadero (8). El café en Colombia es uno de los principales productos de exportación y representa el 22% del PIB agrícola; adicionalmente, los beneficios ambientales del cultivo del café y sus diferentes sistemas de producción incluyen conservación de la biodiversidad, mejoramiento de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo y mantenimiento del microclima. En este caso, el pago de servicio ambiental por fijación y almacenamiento de carbono representa un valor agregado a la producción, que podría tener gran potencial e importancia para los productores (1).

Es importante desarrollar metodologías para obtener el balance energético, basado en las fijaciones y emisiones de carbono, como una herramienta de cuantificación no sólo para el cultivo del café, sino también para otras especies que se encuentren asociadas al sistema productivo cafetero, teniendo de esta manera un agregado en cuanto a la cantidad de carbono disponible en dichos sistemas. Es así como se podría abordar la contabilidad en el sitio de producción, como son las fincas, bajo los diferentes sistemas encontrados. Si bien el sector cafetero en conjunto con empresas del sector forestal comercial, ha venido desarrollando modelos que permiten calcular el crecimiento y acumulación de carbono en algunas especies asociadas, es necesario integrar este conocimiento bajo esquemas temporales y espaciales de análisis, a la vez que deben incluirse nuevas especies que tienen importancia en dichos sistemas, como pueden ser el plátano y el guamo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron tres sistemas productivos cafeteros: café (*Coffea arabica* L.) a libre exposición, café con sombrío productivo en barreras de plátano dominico hartón (*Musa AAB Simmonds*) y café con sombrío de guamo (*Inga edulis*), en los cuales se realizó la contabilidad del carbono con base en las fijaciones y emisiones de dióxido de carbono, durante el ciclo de vida de las especies de café, plátano y guamo. La cubicación del guamo, como el método destructivo de evaluación, se realizó en dos municipios del norte del Valle del Cauca, en tres fincas que comprenden los municipios de El Águila y Argelia, con las mismas condiciones de manejo del cultivo, con alturas en rango cafetero entre 1.200 y 1.900 m. El trabajo de cubicación de plátano dominico hartón se desarrolló en la finca El Bambusal, vereda Pueblotapao, municipio de Montenegro (Quindío), con una altura de 1.294 m.

El trabajo se desarrolló en tres etapas: primero la cubicación de las especies de plátano dominico hartón y guamo santafereño, seguida del desarrollo de una metodología para cuantificar balances de carbono, y, por último, se estructuró un ejemplo práctico de cuantificación y balance de carbono en un sistema productivo de café con barreras de plátano.

Para obtener la contabilidad del carbono se identificaron los factores o prácticas donde se fija o se emite carbono atmosférico en el sistema, dependiendo de las especies. Estos factores fueron relacionados con la edad de la planta y las diferentes prácticas culturales que se desarrollan, dependiendo del ciclo de cada cultivo.

La acumulación de materia seca es una de las mejores formas para analizar

el crecimiento de las plantas (15). En los tres sistemas de producción se obtuvo la materia seca por medio del método directo o destructivo (cubicación) de las especies, el cual consistió en medir los parámetros básicos de una planta o árbol (peso fresco y seco), apeándolo y calculando la biomasa mediante pesaje de cada uno de sus órganos (raíz, fuste, ramas, follaje y frutos). Luego, los pesos secos se transformaron a carbono equivalente para cada sistema. El carbono equivalente (CO₂eq) corresponde a la cantidad extraída de CO₂ de la atmósfera y convertida en carbono a través el proceso fotosintético al interior de la planta (Ecuación <1>):

$$PS \times 0,50 \times 3,66 = \text{dióxido de carbono equivalente (CO}_2\text{eq) } <1>$$

Donde:

PS = peso seco (kg)

0,50 = 50%, porcentaje de carbono (en caso de no existir el dato de investigación)

3,66 = Constante para convertir carbono en dióxido de carbono equivalente (CO₂eq)

Para el cultivo del plátano se seleccionaron plantas de siete edades (2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 meses) y para el sombrío de guamo se seleccionaron seis edades (2, 4, 8, 10, 15 y 20 años). Se efectuaron cinco repeticiones, dentro de un área de 1 hectárea. Cada repetición estuvo constituido por una planta seleccionada aleatoriamente, de plátano o guamo, que tuviera la edad correspondiente. El peso seco se obtuvo tomando una muestra de 250 g, que fueron llevados a peso seco constante, en una estufa de extracción de humedad, a una temperatura de 65°C durante 48 h.

Construcción y análisis de curvas de crecimiento y desarrollo. Para cada una de las edades de las plantas y con las cinco repeticiones, se construyeron curvas de desarrollo mediante gráficos de dispersión

y regresiones no lineales en función de la edad y el tiempo térmico, usando el software SigmaPlot versión 10, con el fin de conocer la dinámica de fijación de CO₂ con respecto a la edad del cultivo (café, plátano o guamo). La obtención de la biomasa de café se realizó por medio de modelación estadística de los experimentos de crecimiento y desarrollo de la disciplina de Fisiología del Centro Nacional de Investigaciones del Café, Cenicafé (16), que fueron desarrollados en tres localidades de la zona cafetera colombiana (Estación de Marquetalia, Estación Central Naranjal y Estación Paraguacito), donde se obtuvo la información de temperaturas para el cálculo del tiempo térmico y donde se desarrollaron trabajos de cubicación en el campo.

Cálculo del tiempo térmico. El tiempo térmico se utilizó para remover el efecto del diferencial de temperatura de los sitios geográficos sobre la acumulación de biomasa de las plantas. Esto funciona debido a que el tiempo térmico es una medida de calor diario (unidades térmicas en grados centígrados), que reciben las plantas dependiendo de sus temperaturas críticas de crecimiento; por tal razón, las curvas de crecimiento se trabajaron de igual manera en función del calor recibido. Para el cálculo del tiempo térmico se utilizó la información histórica y actual de las variables climáticas: temperaturas mínima, media y máxima diarias, obtenidas de estaciones meteorológicas en el área de influencia de las plantaciones. Con estos valores se calculó el tiempo térmico diario en grados día acumulados ($^{\circ}\text{D}_{\text{acum}}$) hasta la fecha de muestreo, de acuerdo con Lovatt *et al.* (12).

La temperatura fue calculada con base en la diferencia de altitud entre el sitio y la estación, aplicando el sistema de Chaves y Jaramillo (7). Una vez se registraron las coordenadas de localización y altitud del sitio

donde se simuló el crecimiento, a través de cálculos vectoriales, el sistema seleccionó la estación más cercana, de acuerdo con los criterios de regionalización de brillo solar y de temperatura del aire en Colombia. Inmediatamente seleccionada la estación y el período de tiempo de simulación, se corrigió por altitud la base de datos de temperatura, haciendo uso de factores de corrección desarrollados a partir de modelos de regresión lineal que relacionan la altitud y la temperatura en cada región.

La información del clima se obtuvo de la Red Climática de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC); la estación meteorológica seleccionada en el departamento del Quindío más cercana al sitio de cubicación del cultivo del plátano fue El Agrado y para el departamento del Valle del Cauca (municipios El Águila y Argelia), donde se realizó la cubicación de los guamos, fue la estación meteorológica de Albán.

Cuantificación y balance de carbono en sistemas productivos cafeteros. La información generada (peso seco y carbono) para cada uno de los cultivos, dependiendo de su edad, se utilizó como base para el desarrollo de una metodología que permitió cuantificar las fijaciones y emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), además de determinar su balance en el ciclo productivo de cada cultivo. Para cada una de las especies estudiadas (café, guamo y plátano) se determinó la información de los diferentes procesos, etapas y fases asociadas que tienen relación con los procesos de fijaciones y emisiones de CO₂ atmosférico. Esta información permitió cuantificar el balance de carbono para cada especie y para cada sistema de producción asociado con café (Ecuación <2>).

$$\text{Balance de carbono} = \text{Fijaciones} - \text{Emisiones} \text{ <2>}$$

Para obtener el carbono equivalente del material en estudio, se multiplicó la biomasa seca por 0,5 (50% aproximadamente de carbono, en caso de no existir el dato experimental); luego, el valor resultante se multiplicó por 3,66 que es el factor de conversión a dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), y que resulta de la Ecuación <3>.

$$\text{Peso molecular del CO}_2 / \text{Peso molecular del carbono} = 44 / 12 = 3,66 \text{ <3>}$$

Análisis de la información. El experimento fue de tipo observacional (no se tuvieron tratamientos inducidos sobre los árboles), por lo tanto, se analizaron las condiciones existentes en el campo. De igual manera, se analizó la información mediante ANOVA y comparaciones múltiples. Se midieron las variables de respuesta en cinco árboles, por cada edad. Estas variables correspondieron a los pesos secos totales de cada una de las especies evaluadas. Se utilizó el tiempo térmico como variable independiente y se ajustaron modelos empíricos no lineales para describir la relación de éstos con la variable dependiente. Con la ayuda del programa MS Excel 2007 se crearon las bases de datos y los modelos matemáticos se realizaron con la ayuda del software SigmaPlot versión 10.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación de fijaciones de CO₂eq y modelos de crecimiento

El modelo sigmoideal fue el que mejor representó el comportamiento de las tres especies con base en el tiempo térmico. La Tabla 1 muestra el valor máximo de peso seco en café de 6.174,1 g, con su tasa máxima de desarrollo a los 17.027,2 °Dacum. Para el plátano dominico hartón, estos valores corresponden a 8.928,6 g y 1.457 °Dacum y para el guamo a 1.538,6 y

55.491,3 °Dacum. Estos resultados concuerdan con los reportes de Briggs *et al.* (3), sobre el crecimiento de dos cultivos de maíz, donde muestra que las curvas en función de la materia seca son modelos sigmoideales.

Con la modelación (Tabla 1) y teniendo en cuenta el número de días y el tiempo térmico, se obtiene la cantidad de CO₂eq (g), fijado por la planta (Ecuación <4>).

$$\text{Fijación kg CO}_2\text{eq} = \text{Valor resultado del modelo} \times 0,5 \times 3,66 \text{ <4>}$$

Cuantificación de las emisiones de CO₂

Las emisiones de dióxido de carbono atmosférico en un cultivo están dadas por diferentes prácticas culturales a través de su ciclo productivo, entre ellas están: Transporte, aspersiones para el control de plagas y enfermedades con equipos motorizados, fertilización nitrogenada, control de arvenses con guadaña, gastos de energía eléctrica consumida por motores, gastos de energía eléctrica consumida por bombillos y otras fuentes de energía.

Emisiones de CO₂eq asociadas al transporte.

Se tuvieron en cuenta las emisiones de CO₂ a la atmósfera, generadas en el transporte con automotores, debido al uso de combustibles como gasolina, ACPM y gas natural (Ecuación <5>). Las emisiones pueden presentarse en diferentes etapas del proceso como transporte de plántulas (cuando son compradas externamente), transporte de fertilizantes, agroquímicos y combustibles, transporte del producto al proceso de beneficio y transporte del producto al sitio de venta (Tabla 2).

Este factor depende de diferentes variables para ser calculado: tipo de combustible, distancia recorrida, tamaño del motor, capacidad del vehículo y peso a transportar, entre otros.

Tabla 1. Modelos de crecimiento para tres especies en sistemas de producción cafeteros, en función del tiempo térmico.

Especie	Modelo		a	b	x ₀	R ²
Café (<i>Coffea arabica</i>)	f=a/(1+exp(-(x-x ₀)/b))	Sigmoidal	6.174,2	3.33,2	17.027,2	0,99
Plátano dominico hartón (<i>Musa AAB simmonds</i>)	f=a/(1+exp(-(x-x ₀)/b))	Sigmoidal	8.928,6	128.9	1457.7	0,89
Guamo (<i>Inga edulis</i>)	f=a/(1+exp(-(x-x ₀)/b))	Sigmoidal	1.538,6	11.864,9	55.491,3	0,98

Emisión de CO₂eq transporte = Consumo combustible x Factor de emisión del combustible <5>

Emisiones de CO₂eq asociadas a aspersiones con equipos motorizados.

Cuando se realiza la aspersión de algunos productos bien sea biológicos o químicos, se utilizan diferentes equipos de aspersión (11), de los cuales producen emisiones de CO₂ a la atmósfera, aquellos que utilizan combustibles como gasolina o ACPM (Ecuación <6>).

Emisión de CO₂eq equipos motorizados = Consumo combustible x Factor de emisión del combustible <6>

Emisiones de CO₂eq asociadas a la fertilización nitrogenada.

Las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados son consideradas un factor que influye en las liberaciones de óxido nitroso (N₂O) a la atmósfera, siendo éste un gas de efecto invernadero, inclusive 296 veces más contaminante que el CO₂ (18). La utilización de fertilizantes químicos (nitrogenados) es una práctica usada y recomendada en Colombia, y es por esta razón, que afecta el balance de carbono, convirtiéndose en una emisión de CO₂ a la atmósfera.

Dependiendo del grado del fertilizante y la cantidad de nitrógeno que contenga, se da la emisión de óxido nitroso (N₂O) a la atmósfera; en los cálculos, el óxido nitroso es convertido a dióxido de carbono equivalente, con el fin de facilitar la contabilidad del

carbono en términos de CO₂eq, de acuerdo con las Ecuaciones <7> y <8>. Además, se tuvo en cuenta que 1 g de nitrógeno aplicado emite 2,19 g de CO₂eq (18).

Emisión de CO₂eq fertilización nitrogenada = Consumo fertilizante x factor de emisión del fertilizante <7>

Factor de emisión del fertilizante = Grado de nitrógeno del fertilizante x 100 x 2,19 <8>

Emisiones de CO₂eq asociadas al control de arvenses con guadaña.

Para el control de arvense uno de los métodos es la utilización de guadañas, equipos que funcionan con gasolina (Ecuación <9>).

Emisión de CO₂eq guadaña = Consumo gasolina x Factor de emisión de la gasolina <9>

Emisiones de CO₂eq asociadas a gastos de energía eléctrica consumida.

Los gastos de energía eléctrica son emisiones de CO₂ al medioambiente, debido a que en ocasiones la energía proviene de termoeléctricas que consumen combustibles fósiles en su funcionamiento. Esta energía puede ser utilizada en motores durante el proceso de beneficio o por la utilización de bombillos (Ecuaciones <10> y <11>).

Emisión de CO₂eq motores = Kilovatios consumidos x Factor de emisión energía eléctrica <10>

Tabla 2. Factores de emisión de CO₂eq a la atmósfera respecto a fuentes de energía.

Material combustible	Factores de emisión	Fuente
Gasolina	2.328 g CO ₂ eq/L	EPA (21)
	2.212 g CO ₂ eq L	UPME (20)
	2.315 g CO ₂ eq/L	Carbon trust (5)
	2.382 g CO ₂ eq/L	GHG Protocol (14)
ACPM - Diésel	2.672 g CO ₂ eq/L	EPA (21)
	2.665 g CO ₂ eq/L	UPME (20)
	2.630 g CO ₂ eq L	Carbon trust (5)
	2.746 g CO ₂ eq/L	GHG Protocol (14)
Carbón mineral	2.580 g CO ₂ eq/kg	Casnovas (6)
	2.460 g CO ₂ eq/kg	UPME (20)
Cisco	1.808 CO ₂ eq/kg	Rodríguez (17)
Madera (tallos café)	1.863 g CO ₂ eq/kg	Obando (13)
Gas natural	1.922 g CO ₂ eq/m ³	Carbon trust (5)
	1.965 g CO ₂ eq/m ³	UPME (20)
Gas propano (GLP)	2.930 g CO ₂ eq/kg	UPME (20)
Borra	2.110 g CO ₂ eq/kg base seca	Rodríguez (17)
Energía eléctrica	431 g CO ₂ eq/kwh	UPME (19)
Fertilizantes nitrogenados - aplicación	2,19 g CO ₂ eq / g N aplicado	Snyder (18)

Emisión de CO₂eq bombillos = Kilovatios consumidos x Factor de emisión energía eléctrica <11>

Se tuvo en cuenta la siguiente información:
 1 HP = 0,736 kw.h⁻¹ (10)
 El factor emisión electricidad: 1 kw.h⁻¹= 431 g CO₂eq (19)
 1 watt = 0,001 kw.h⁻¹ (22).

Uso de la metodología desarrollada para balances de carbono en sistemas de producción con café

De acuerdo con la anterior metodología, se consideró un sistema productivo cafetero con café de 4 años de edad y barreras de plátano dominico hartón, las barreras a 12 m entre sí y 3 m entre sitios de producción. Densidad para el café de 5.000 plantas por hectárea y una densidad de siembra para plátano de 416 sitios de producción por hectárea. En las Tablas 3

y 4 se presentan los balances de carbono para los sistemas de producción de café y plátano, respectivamente.

El balance del carbono del sistema de café y producción de plátano presentó un valor de 194 toneladas CO₂ eq/ha de carbono, positivo, lo que quiere decir que se tiene un excedente de carbono en el sistema.

Este resultado, está acorde con los obtenidos por Ávila (2), quien determinó un rango de almacenamiento de 120 a 195 t.ha⁻¹ de C, en cuatro sistemas agroforestales con café, tres asociados con *Eucalyptus deglupta* de 4, 6 y 8 años de edad y uno con Poró (*Erythrina poeppigiana*), en el Valle Central de Costa Rica.

Con el desarrollo de esta investigación, se obtuvo una metodología basada en la contabilidad de las fijaciones y emisiones

Tabla 3. Balance de carbono en un cultivo de café con 4 años de edad.

Etapas y prácticas	Emisión (kg CO₂,eq)	Fijación (kg CO₂,eq)
Almacenamiento de carbono en el cultivo (utilización de modelos)		190.874,0
Emisiones de CO ₂ asociadas al transporte de:		
Plántulas	928,4	
Fertilizante	721,6	
Cooperativa	968	
Emisiones de CO ₂ por equipos de aspersión en el manejo de plagas y enfermedades	101,9	
Emisiones de CO ₂ por fertilización nitrogenada	3.687,9	
Emisiones de CO ₂ por equipos utilizados en el control de arvenses	223,2	
Emisiones por gastos de energía eléctrica consumida por motores	2,6	
Emisiones por gastos de energía eléctrica en el uso de bombillos y lámparas	0,6	
Emisiones por uso de otros combustibles	0	
Total	6.631,7	190.874,0
Balance (fijaciones- emisiones)		184.242,3 (+)

Tabla 4. Balance de carbono en un cultivo de plátano dominico hartón con 14 meses de edad.

Etapas y prácticas	Emisión (kg CO₂,eq)	Fijación (kg CO₂,eq)
Almacenamiento de carbono en el cultivo (utilización de modelos)		10.939
Emisiones de CO ₂ asociadas al transporte de:		
Plántulas	0,549	
Fertilizante	22	
Cooperativa	549,1	
Emisiones de CO ₂ por equipos de aspersión en el manejo de plagas y enfermedades	101,9	
Emisiones de CO ₂ por fertilización nitrogenada	92,9	
Emisiones de CO ₂ por equipos utilizados en el control de arvenses	223,2	
Emisiones por gastos de energía eléctrica consumida por motores	2,61	
Emisiones por gastos de energía eléctrica en el uso de bombillos y lámparas	0,59	
Emisiones por uso de otros combustibles	0	
Total	992,90	10.939
Balance (fijaciones- emisiones)		9.946,1 (+)

a través del ciclo productivo de cada uno de los cultivos, donde se determinó, bajo unas condiciones específicas, la cantidad de carbono para un sistema productivo de café y plátano. Desde el punto de vista del balance de carbono, para los sistemas de producción planteados, se demuestra cómo la asociación de diferentes sistemas cafeteros permite cuantificar ganancias desde el punto de vista del carbono comparado con sistemas en monocultivo. En general, con la metodología de balances de energía, puede obtenerse de manera cuantitativa el potencial de almacenamiento de carbono de los sistemas productivos cafeteros, así como el valor por tonelada de carbono almacenada temporalmente por hectárea, dando las pautas para establecer las compensaciones por este servicio ambiental y así crear la gestión para reducir las emisiones de carbono a la atmósfera.

AGRADECIMIENTOS

Al profesional en mercadeo Diego Fernando Alzate, al auxiliar de laboratorio Anderson Aguirre, a la doctora Ximena Restrepo, al Comité Departamental de Cafeteros del Valle del Cauca en cabeza del doctor Héctor Fabio Ospina, a los Extensionistas del Municipio del Águila y Argelia – Valle, al ingeniero agrónomo Héctor Chica, al ingeniero forestal Diego Obando y al Ingeniero agrónomo Juan Carlos Mejía Nariño.

LITERATURA CITADA

1. ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ J., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2007. 309 p.
2. ÁVILA, V.G. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra a pleno sol, sistemas agro pastoriles y pasturas a pleno sol. Turrialba:

CATIE. Escuela de posgrado, 2000. 99 p. Tesis magister en agroforestería tropical.

3. BRIGGS, G.E.; KIDD, F.; WEST, C.A. Quantitative analysis of plant growth. *Annals of applied biology* 7:202-223. 1920.
4. CABALLERO, M.; LOZANO, S.; ORTEGA, B. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria UNAM* 8(10):1067-6079. 2007.
5. CARBON TRUST. Guidelines to defra's GHG conversion factors for company reporting. Annexes. [En línea]. Reino Unido : Defra, 2008. Disponible en internet: <http://www.defra.gov.uk/environment/business/reporting/pdf/conversion-factors.pdf>
6. CASANOVAS, M. Actividades del proyecto MDL en bioenergía: El caso de la provincia de Buenos Aires. [En línea]. Mendoza : Uncu, 2006. Disponible en internet: <http://www.uncu.edu.ar/contenido/skins/unc/download/Ing%20Monica%20Casanovas.ppt>
7. CHAVES, B.; JARAMILLO, A. Regionalización de la distribución del brillo solar en Colombia, por métodos de conglomeración estadística. *Cenicafé* 48(2):120-132. 1997.
8. CUÉLLAR, N.; ROSA, H.; GONZÁLEZ, M. Los servicios ambientales del agro: El caso del café de sombra en El Salvador. *Prisma* 34:1-16. 1999.
9. DALANEY, M.; BROW, S.; LUGO, A.; TORRES, L.; QUINTERO, N. The distribution of organic carbon in major components of forest located in five zones of Venezuela. *Journal tropical ecology* 13:697-708. 1997.
10. DEFINICIONES DE energía y potencia. [En línea]. España : windpower, 2008. Disponible en internet: <http://www.windpower.org/es/stat/unitsene.htm>. Consultado en junio de 2009.
11. FNC. Manejo seguro de productos biológicos y químicos para el control de plagas y enfermedades del café. p. 112-128. En: FNC. Cartilla cafetera. Chinchiná : Cenicafé, 2004. 2 Vols.
12. LOVATT, C.; STREETER, S.; MINTER, T.; O'CONNELL, N.; FLAHERTY, D.; FREEMAN, M.; GOODELL, P. Phenology of flowering in *Citrus sinensis* [L.] Osbeck, cv. Washington navel orange. *Proceedings of the international society of citriculture* 1:186-190. 1989.

13. OBANDO, D. Observaciones en experimentos realizados en fisiología vegetal durante el año 2006 en árboles de café de 3 años de edad. Chinchiná : Cenicafé, 2008. (Comunicación personal).
14. PROTOCOLO DE gases efecto invernadero. Calculating CO₂ emissions from mobile sources. [En línea]. Suiza : GHGPROTOCOL, 2005. Disponible en internet: [http://www.ghgprotocol.org/calculation-tool/downloads/calcs/CO₂-mobile.pdf](http://www.ghgprotocol.org/calculation-tool/downloads/calcs/CO2-mobile.pdf)
15. RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Contribuciones potenciales de la agricultura colombiana a la mitigación del cambio climático. p. 234-250. En: Seminario científico Ciencia y agricultura tropical para el siglo XXI. Bogotá : Cenicafé, 2008.
16. 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. Cenicafé 55(4):265-276. 2004
17. RODRÍGUEZ, N. Aprovechamiento de los residuos sólidos generados en el cultivo e industrialización del café para la producción de hongos comestibles y medicinales. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2003. 140 p.
18. SNYDER, C.S.; BRUULSEMA, T.W.; JENSEN, T.L. Greenhouse gas emissions from cropping systems and the influence of fertilizer management: A literature review. [En línea]. U.S.A. : IPNI, 2007. Disponible en internet: <http://www.ipni.net>
19. UPME. Metodología simplificada para el cálculo de la línea para proyectos de pequeña escala. Bogotá : UPME, 2006. 36 p.
20. UPME. Factores de emisión de los combustibles colombianos. [En línea]. Bogotá : UPME, 2003. Disponible en internet: http://www.siame.gov.co/siame/documentos/documentación/mdl/doc/18_fecoc.doc
21. EPA. Office of transportation and air quality. Emission facts average carbon dioxide emissions resulting from gasoline and diesel fuel. [En línea]. U.S.A : EPA, 2005. Disponible en internet: <http://www.epa.gov/OMS/climate/420f05001.pdf>
22. WATT IS the quantity of energy used or supplied per unit time (also called power). [En línea]. U.S.A : MHI, 1991. Disponible en internet: http://www.mhi-inc.com/Converter/watt_calculator.htm

EFECTO DEL NIVEL DE INTROGRESIÓN Y DEL AMBIENTE SOBRE LA POLINIZACIÓN EN CRUZAMIENTOS CONTROLADOS DE CAFÉ

Juan Carlos Herrera Pinilla.*; Laura Fernanda Gonzales**

HERRERA P., J.C.;GONZALES, L.F. Efecto del nivel de introgresión y del ambiente sobre la polinización en cruzamientos controlados de café. *Cenicafé* 64 (2): 17-30. 2013

El efecto del nivel de introgresión de los progenitores masculinos durante la polinización manual del café fue evaluado en la Estación Central Naranjal de Cenicafé. Para ello se estimó la frecuencia de cuajamiento y la eficiencia de polinización de 101 cruzamientos, intra e interespecíficos, utilizando las especies *Coffea arabica* y *C. liberica*. A manera de comparación se evaluaron las mismas variables en autofecundaciones controladas sobre *C. arabica*. Se observó que la frecuencia de cuajamiento de cruzamientos en que intervienen las líneas S.288, S.795 y BA-2 (consideradas como poco introgresadas por la especie diploide *C. liberica*), fue similar a la observada para los cruces interespecíficos con el híbrido Kawisari (híbrido tetraploide natural entre *C. liberica* y *C arabica*). Sin embargo, la eficiencia de cruzamiento fue significativamente superior ($p<0,05$) para los cruces intraespecíficos, observándose incluso diferencias entre S.288 y los genotipos S.795 y BA-2, las cuales se explican por su origen genético. La eficiencia de cruzamiento mostró ser una variable directamente dependiente de la frecuencia de cuajamiento ($R^2 = 0,912$), sin embargo esta relación no se mantuvo igual para el caso de los cruzamientos interespecíficos involucrando el híbrido Kawisari y *C. liberica*, debido a la reducción significativa de frutos jóvenes que ocurre a causa de la incompatibilidad genética entre progenitores. Una comparación entre cruzamientos realizados en dos épocas distintas en el año 2011, mostró que la eficiencia de los cruzamientos también puede verse disminuida por las precipitaciones previas a la polinización controlada.

Palabras clave: Polinización cruzada, compatibilidad genética, *Coffea liberica*, hibridación.

EFFECT OF INTROGRESION LEVELS AND THE ENVIRONMENT ON THE POLLINATION IN COFFEE CONTROLLED CROSSINGS

The effect of introgression level of male parents during hand pollination of coffee was evaluated in the Experimental Station Naranjal of Cenicafé by estimating the frequency of young fruits and pollination efficiency of 101 crosses involving *Coffea arabica* and *C. Liberica* species. The same variables were compared in controlled self pollinations in *C. arabica*. The frequency of young fruit of crosses, in which lines S.288, S.795 and BA-2 (considered lowly introgressed by the diploid species *C. liberica*) were concerned, was similar to that observed in the interspecific crosses with the Kawisari hybrid (a natural tetraploid hybrid between *C. liberica* and *C arabica*). However, the crossing efficiency was significantly higher ($p<0,05$) for intraspecific crosses, even with differences between S.288 and genotypes S.795 and BA-2, which is explained by their genetic origin. Mating efficiency showed to be a variable directly dependent on the frequency of young fruit ($R^2 = 0.912$), but this relation was not equal for the interspecific crosses involving the Kawisari hybrid and *C. liberica* due to the significant reduction of young fruits that occurs because of the genetic incompatibility between parents. A comparison of crosses made in two different periods in 2011 showed that the efficiency of crosses can also be diminished by precipitations prior to controlled pollination.

Keywords: Cross pollination, gene introgression, genetic compatibility, *Coffea liberica*, plant hybridization.

* Biólogo, MSc, PhD. Investigador Científico III, Disciplina Mejoramiento Genético, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

** Bióloga, Investigadora asociada, Disciplina de Mejoramiento Genético (Hasta el 1 febrero de 2011), Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La polinización es el proceso mediante el cual los gametos masculinos (polen) de una planta se ponen en contacto con la estructura receptiva (estigma) del órgano femenino de la flor. Una vez el polen se adhiere al estigma se activa el desarrollo del tubo polínico, el cual se dirige al ovario a través del estilo. Este proceso finaliza con la formación del cigoto, gracias a la fusión del contenido genético del polen con el núcleo de la ovocélula (fecundación). Es a partir del cigoto que se desarrollará el nuevo fruto. En condiciones naturales, la polinización permite la supervivencia de un elevado número de especies cultivadas por el hombre, las cuales comparten este tipo de reproducción, ya que asegura la transferencia del material genético de una generación a la siguiente, a la vez que contribuye a incrementar su productividad (13).

Según la procedencia del polen es posible distinguir dos tipos de polinización. Cuando éste proviene de las anteras de la misma flor que será fecundada se denomina autopolinización. Cuando el polen proviene de una flor diferente, generalmente de otra planta de la misma especie, se dice que la polinización es cruzada. En el café se encuentran estos dos mecanismos de polinización natural. En la especie *C. arabica* ocurre preferencialmente la autopolinización (>90%), mientras que en las demás especies, incluida la especie diploide cultivada *C. canephora*, se presenta la polinización cruzada, debido a la presencia de alelos de autoincompatibilidad (2).

El mejorador de plantas se vale de la hibridación para combinar las mejores características de dos progenitores, en una nueva planta denominada "híbrido", el cual se obtiene mediante polinización controlada o manual. Dadas las ventajas que ofrece, esta práctica constituye la herramienta principal del mejoramiento de cultivos para crear

variabilidad genética y explotarla posteriormente por medio de selección, haciendo posible la conjugación de múltiples factores genéticos de importancia agronómica en las nuevas variedades.

La producción controlada de híbridos dentro de la especie *C. arabica* y entre ésta y las demás especies del género, ha sido una práctica común desde los inicios del mejoramiento del café, hace ya más de 80 años. Cuando el cruzamiento se hace entre plantas de una misma especie se le denomina intraespecífico, mientras que si involucra plantas de diferentes especies (por ejemplo, *C. arabica* y *C. canephora*), se habla de un cruzamiento interespecífico. En todos los casos el objetivo es el mismo: conjugar caracteres de interés agronómico en el híbrido obtenido.

Durante la producción de híbridos intra o interespecíficos lo que se busca es obtener un máximo de recombinación genética, acompañado de una buena fertilidad. No obstante, en la práctica resulta difícil encontrar un equilibrio entre estos dos factores.

La introgresión es el proceso mediante el cual una porción del material genético de una especie es transferida hacia el genoma de otra especie relacionada (genotipo introgresado), gracias a la hibridación. El éxito de la introgresión depende de las posibilidades de hibridación entre dos especies o genotipos, las cuales guardan relación con el grado de proximidad genética que posean (9). Genotipos muy diferentes genéticamente tienen pocas posibilidades de introgresión, debido a la aparición de barreras reproductivas, que pueden ser pre-cigóticas, cuando impiden la formación del cigoto, y/o post-cigóticas, cuando limitan el desarrollo del cigoto ya formado. Estas barreras son esencialmente el resultado de la incompatibilidad genética

entre los cromosomas de las dos especies hibridizadas y sus consecuencias se verán reflejadas en la fertilidad de los híbridos, los cuales van a sufrir una recombinación deficiente durante la meiosis (9, 26).

A pesar de su importancia, son pocos los estudios realizados en café sobre los factores limitantes de la polinización manual. Aspectos tales como: el método de emasculación (14), el embolsado de las ramas y el almacenamiento del polen (22, 25), así como la disposición de las plantas receptoras y donadoras en el campo (8, 18) han sido objeto de estudios más o menos detallados. En Colombia, Jiménez y Castillo (10) realizaron observaciones relacionadas con la eficiencia de la polinización artificial respecto a la polinización natural, en aspectos como la frecuencia de formación de frutos, el momento adecuado para hacer la emasculación según el color de las flores y la forma de recolección del polen.

Según Carvalho (5), el éxito de la obtención de frutos por polinización artificial en café depende de varios factores: (i) las condiciones vegetativas de la planta madre, (ii) la compatibilidad de los genotipos cruzados, (iii) la constitución citológica y genética de las plantas cruzadas, y (iv) las condiciones ambientales durante el desarrollo del fruto. Dentro de éstos, el análisis de los factores genéticos y particularmente de la introgresión, merecen especial atención como factores limitantes del proceso de polinización artificial. Conocer su efecto puede ser de gran importancia para predecir la obtención de genotipos híbridos y de paso planificar de una mejor manera los cronogramas de cruzamiento. En este orden de ideas, el objetivo del presente estudio fue examinar el efecto del nivel de introgresión de los progenitores masculinos (donantes de polen) sobre la eficiencia de los cruzamientos realizados por polinización manual, tal como

se realiza actualmente en Cenicafé, utilizando para ello un conjunto de datos tomados a partir de diversos cruzamientos tanto intra como interespecíficos realizados por la Disciplina de Mejoramiento Genético. Paralelamente, se comparó la eficiencia de cruzamientos realizados en dos momentos diferentes del año, a fin de analizar el posible efecto de los factores climáticos imperantes durante la polinización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Origen y tipo de cruzamientos analizados

Con el fin de entender la relación entre el nivel de introgresión y la eficiencia del proceso de polinización artificial, se compararon los datos de campo derivados de diferentes cruzamientos realizados en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, durante el año 2011.

En la Tabla 1 se describe la genealogía de los genotipos utilizados en todos los cruzamientos. En esencia, se realizaron dos tipos de cruzamientos: intra- e interespecíficos. En todos los casos la planta receptora del polen (progenitor femenino) estuvo representada por una línea avanzada derivada del cruzamiento entre Caturra x Híbrido de Timor, a las cuales se les denominará en adelante como Catimores.

Los tres primeros cruzamientos analizados fueron catalogados como intra-específicos teniendo en cuenta que los genotipos usados como progenitores masculinos (donantes del polen) presentaban un grado de introgresión muy bajo, con un fondo genético esencialmente derivado de la especie *C. arabica*. Estos genotipos correspondieron a líneas S.288, S.795 y BA-2, las cuales son derivadas de selecciones avanzadas en el programa de mejoramiento de la India (16, 17).

Tabla 1. Descripción del tipo y número de cruzamientos estudiados.

Cruzamiento	Tipo ^{2/}	Número de cruzamientos analizados	Total de flores polinizadas
Variedades <i>C. arabica</i> autofecundadas	Control	5	2.152
Línea de (Cat x HdT)1/ x S288/23	Intraespecífico	18	2.265
Línea de (Cat x HdT) x S795	Intraespecífico	21	2.264
Línea de (Cat x HdT) x BA-2	Intraespecífico	31	4.338
Línea de (Cat x HdT) x Kawisari	Interespecífico	24	2.999
Línea de (Cat x HdT) x <i>C. liberica</i>	Interespecífico	7	1.120
	Total	106	15.138

^{1/} Las plantas receptoras de polen (progenitores femeninos) fueron líneas F4-F5 derivadas de diferentes experimentos (MEG271, MEG527, MEG1316 y MEG1337), producto de cruzamientos entre Caturra x Híbrido de Timor.

^{2/} El tipo de cruzamiento se determinó de acuerdo al genotipo de los respectivos progenitores masculinos.

Los cruzamientos inter-específicos fueron catalogados como tales ya que las plantas donantes del polen estaban representadas por genotipos con un fondo genético esencialmente distinto al de *C. arabica*. El híbrido natural tetraploide ($2n=4x=44$) Kawisari, proviene del cruce entre *C. liberica* x *C. arabica*, razón por la cual es posible suponer que al menos un 33% de su genoma está introgresado por la especie diploide. Por su parte, la especie *C. liberica* ($2n=2x=22$) representa, para este caso, el máximo nivel de introgresión (100%).

En total se estudiaron 106 eventos de polinización manual. Para cada cruce se marcaron entre cuatro y diez ramas por árbol; en cada rama se seleccionó un mínimo de 15 flores para su polinización. Como resultado, se polinizaron 15.138 flores, usando la metodología establecida por Cenicafé para tal fin. A manera de comparación se tuvieron en cuenta los datos previos de autopolinizaciones manuales realizadas en la Disciplina de Mejoramiento Genético. Estas autopolinizaciones fueron realizadas sobre 2.152 flores de las variedades de *C. arabica* como Caturra, Borbón, San Bernardo, Villa Sarchí y Pacas.

Método de polinización manual

La metodología utilizada para la polinización manual en Cenicafé se basa en la propuesta inicialmente por Carvalho y Mónaco (6). Aunque se han realizado diferentes modificaciones, el protocolo actual no dista mucho del original. Las principales etapas del proceso se describen en la Figura 1. Se inició con la selección de las plantas progenitoras, tanto las masculinas que donaron el polen, como las femeninas que portaron las flores fecundadas por éste. Luego, se seleccionaron algunas ramas del progenitor femenino con botones florales en estado de pre-antesis, se retiraron las estructuras florales masculinas (estambres), proceso denominado emasculación (Figura 1A, 1B). Paralelamente, se recolectó el polen de las flores abiertas presentes en el progenitor masculino (Figura 1C). Posteriormente, se esparció el polen sobre los estigmas de las flores emasculadas previamente (Figura 1D). Una vez polinizadas, las flores tratadas se protegieron con bolsas de papel con el fin de prevenir contaminación con polen externo (Figura 1E). Días después se destaparon y se hizo el seguimiento del desarrollo de las flores que fueron polinizadas hasta que se obtuvieron los

frutos híbridos de primera generación o F1. Tanto los cruces interespecíficos como las autofecundaciones fueron realizados siguiendo esta metodología.

Evaluación de la eficiencia de la polinización

Desde un punto de vista biológico, la eficiencia de la polinización se define como la probabilidad que tiene el polen que llega al estigma de una flor (generalmente depositado por un polinizador), de desarrollarse en fruto. Teniendo en cuenta esto y con el fin de poder evaluar la eficacia de la polinización manual en los diferentes cruzamientos, se consideraron las siguientes variables:

$$1. \text{ Frecuencia de cuajamiento (\%)} = (\text{OVF} / \text{FLP}) \times 100$$

$$2. \text{ Eficiencia de cruzamiento (\%)} = (\text{FRF} / \text{FLP}) \times 100$$

Donde:

OVF, representa el número de flores con ovarios fertilizados, encontrados un mes después de la polinización. Este estado coincide con la Etapa 1 del crecimiento del fruto del café descrita por Salazar *et al.* (21), la cual se prolonga hasta la octava semana. Durante ésta ocurre un crecimiento lento y los frutos tienen apariencia de cabezas de fósforo; aún no hay formación de endospermo, aunque su consistencia es acuosa.

FLP, corresponde al número total de flores polinizadas en cada cruzamiento.



Figura 1. Principales etapas del método de polinización manual de flores de café, utilizado por la Disciplina de Mejoramiento Genético de Cenicafé. **a.** Selección de ramas con flores cerradas en la planta madre (progenitor femenino); **b.** Retiro de los estambres de las flores de la planta madre (emasculación); **c.** Recolección de flores del progenitor masculino, donante del polen; **d.** Polinización manual de flores del progenitor femenino con polen proveniente del progenitor masculino; **e.** Embolsado de las ramas con flores polinizadas, a fin de prevenir contaminación con polen exterior.

FRF, es el número total de frutos formados sobre las ramas luego de 16 semanas después de la polinización. Esta etapa coincide con la Etapa 2 del crecimiento del fruto del café descrita por Salazar *et al.* (21), que inicia en la semana 8 y se prolonga hasta la semana 26. En esta etapa se da inicio al crecimiento rápido del fruto, el cual se caracteriza por un aumento exponencial en su peso fresco.

Efecto de las condiciones ambientales

Con el fin de determinar el efecto de algunos factores ambientales sobre los cruzamientos, se comparó la eficiencia de cuatro cruzamientos independientes los cuales se realizaron en enero 2011, y posteriormente se repitieron en febrero del mismo año. Se registraron los valores promedio de temperatura, brillo solar, humedad relativa y precipitación antes, durante y después de la polinización. En cada época de polinización se seleccionaron entre ocho y diez ramas por cruzamiento y se polinizaron en total 1.640 flores (más de 200 flores por cruzamiento).

Análisis de los datos

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico XLSTAT (versión 6,03 de 2009). Se realizó un ANAVA de una sola vía con el fin de establecer diferencias entre cruzamientos según prueba de Fisher al 99%. Las diferencias entre los promedios de cada tratamiento (cruzamiento), se evaluaron mediante la prueba de Tukey con un intervalo de confianza de 95%. Paralelamente, todos los cruzamientos fueron comparados contra el tratamiento testigo (autofecundaciones) mediante una prueba de Dunnett al 95%.

La relación entre las variables: frecuencia de cuajamiento y eficiencia de cruzamiento, fue analizada mediante una prueba de regresión, en la cual se consideró la eficiencia del

cruzamiento como la variable dependiente (Y) y el porcentaje de cuajamiento como la variable independiente (X).

La comparación entre cruzamientos realizados en dos épocas diferentes fue evaluada según prueba de *t* al 95%, considerando la desigualdad existente entre las varianzas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La polinización, sea natural o artificial, es afectada por diferentes parámetros, cuya importancia varía según el cultivo y el mecanismo de polinización usado. Entre los factores que intervienen en el éxito de los cruzamientos están: la cantidad de polen depositado en el estigma, su viabilidad, su compatibilidad, el número de óvulos disponibles, la tasa de aborto de los óvulos o la tasa de conversión en fruto, entre otros (20, 26). Todos estos factores hacen que la estimación de la eficiencia de la polinización sea una tarea compleja, sin embargo, para el mejorador de plantas esta información resulta importante para planificar el número de cruzamientos a realizar, con el fin de obtener suficiente semilla para formar las nuevas poblaciones de selección. En este trabajo se utilizó la información del número de flores polinizadas y de frutos formados con el fin de establecer el efecto del nivel de introgresión de los genotipos parentales, así como las condiciones climáticas imperantes, sobre la eficiencia de la polinización manual realizada en Cenicafé.

Efecto del nivel de introgresión sobre la eficiencia de la polinización

El éxito en la obtención de frutos depende en buena medida de la afinidad genética entre los dos padres involucrados en el cruzamiento. En el caso del café, es sabido que bajo condiciones naturales todos los

híbridos interespecíficos con *C. arabica* presentan una esterilidad gamética y/o cigótica, variable según la especie diploide utilizada en el cruzamiento (15).

En el presente estudio se puso en evidencia el efecto directo de la introgresión tanto sobre la frecuencia de cuajamiento de las flores como sobre la eficiencia del cruzamiento (Tabla 2). Para la primera variable, se encontraron diferencias significativas entre los cruzamientos analizados, con frecuencias de cuajamiento que oscilaron entre 29,8% y 39,6% para los cruces intraespecíficos entre las líneas de Catimores y los genotipos medianamente introgresados por *C. liberica*, S.288, S.795 y BA-2 (Figura 2). El cruzamiento interespecífico con el híbrido Kawisari mostró un nivel menor de cuajamiento (22,9%), en tanto que, los cruces con la especie *C. liberica* presentaron valores inesperadamente mayores (63,4%). En todos los casos la frecuencia de cuajamiento fue inferior ($p < 0,05$) a la observada para los tratamientos de autofecundación, que presentaron un promedio de 80,8%.

Al analizar la eficiencia del cruzamiento, se observa una tendencia similar en la que los cruces intra-específicos muestran eficiencias entre el 29% y 38%, mientras que los inter-específicos exhiben valores inferiores que van de 12,9% a 16,6% (Figura 3). Es importante resaltar que a pesar de que los híbridos interespecíficos con *C. liberica* tuvieron elevadas frecuencias de cuajamiento, éstas no se tradujeron en un número igualmente elevado de frutos formados, como lo muestran los valores bajos

de eficiencia de cruzamiento obtenidos. La eficiencia media de las autofecundaciones controladas fue de 61,9%, inferior a la observada por Jiménez y Castillo (10), para autopolinizaciones controladas realizadas en Chinchiná, sobre plantas de la variedad Borbón (80,9%).

Estudios de introgresión usando la especie *C. canephora*, muestran que existe una barrera postcigótica muy importante que lleva a una caída significativa del número de frutos normales cuando *C. arabica* es polinizada con polen derivado de híbridos interespecíficos triploides (11). Al parecer, esta reducción sucede por la elevada frecuencia de polen desbalanceado cromosómicamente (es decir, aneuploide) que fertiliza las flores de *C. arabica*. En el caso de los híbridos triploides con *C. liberica*, si bien parece formarse un número importante de cigotos luego de la fecundación, éstos pronto empiezan a degenerar como resultado del desbalance genético entre los gametos (x vs $2x$), dando como resultado un fuerte descenso en el número final de frutos y, por ende, en la eficiencia del cruzamiento.

Mientras en los cruces intraespecíficos se observó una clara dependencia ($p < 0,01$) entre la eficiencia del cruzamiento y la frecuencia de cuajamiento (Figura 4), en los cruces interespecíficos dicha relación deja de ser significativa (Figura 5). En estos últimos, una elevada frecuencia de cuajamiento a las 4 semanas del cruzamiento, no garantiza el desarrollo completo de todos los frutos. La reducción significativa en el número de frutos

Tabla 2. Análisis de varianza para la frecuencia de cuajamiento y la eficiencia de cruzamiento, evaluadas en los diferentes cruzamientos tanto intra- como inter-específicos.

Variable	Fuente de variación	g.l.	SC	CM	F	Probabilidad
Frecuencia de cuajamiento (%)	Cruzamiento	5	20433,48	4086,69	12,97	<0,0001 **
Eficiencia del cruzamiento (%)	Cruzamiento	5	16642,91	3328,58	21,09	<0,0001 **

** Valores significativos a un nivel de confianza del 99 % según prueba de F.

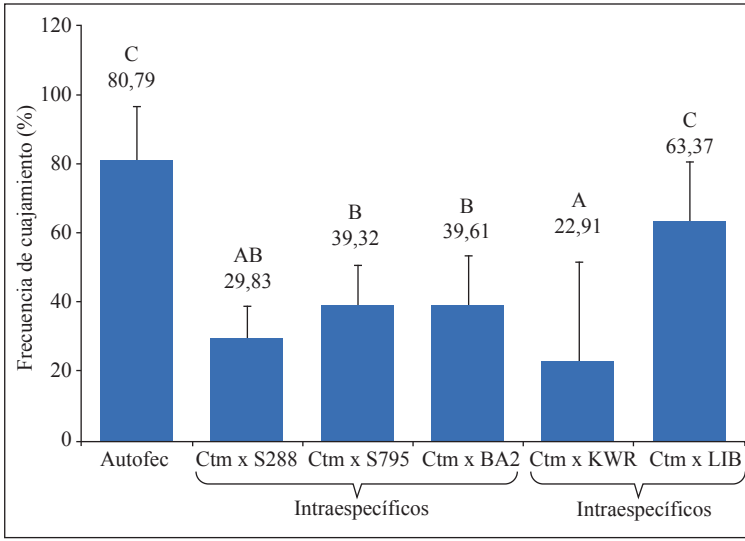


Figura 2. Frecuencia de cuajamiento de los cruzamientos intra- e inter-específicos. La barra indica la desviación estándar estimada. Sobre cada barra se muestran los valores promedio respectivos. Los promedios acompañados de la misma letra, no son estadísticamente diferentes dentro de un intervalo de confianza del 95% según la prueba de Tukey.

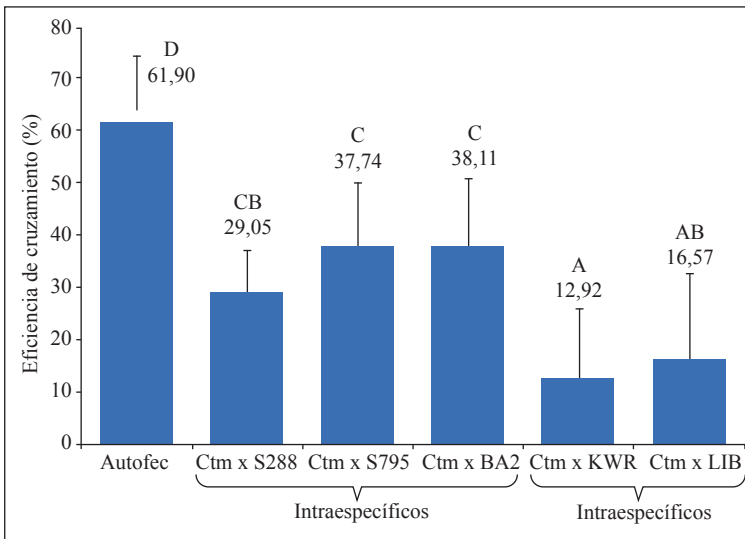


Figura 3. Eficiencia de cruzamiento de los cruzamientos intra- e inter-específicos. La barra indica la desviación estándar estimada. Sobre cada barra se muestran los valores promedio respectivos. Los promedios acompañados de la misma letra, no son estadísticamente diferentes dentro de un intervalo de confianza del 95% según la prueba de Tukey.

jóvenes, es un hecho frecuentemente observado en cruces entre *C. arabica* y las especies diploides. Cuando *C. arabica* ($2n=4x=44$) se cruza con una especie diploide como *C. liberica* ($2n=2x=22$), se observan problemas en la formación de los frutos híbridos, debido en buena medida a la disparidad que existe en su número cromosómico y a las diferencias genéticas entre estas dos especies, las cuales

se manifiestan en baja fertilidad y disturbios a nivel de la meiosis de los pocos híbridos formados (11, 23). El desequilibrio genético que ocurre en la semilla híbrida se traduce en el desarrollo anormal del embrión, o del tejido cotiledonal que le servirá de alimento durante su desarrollo. Según Sybenga (23), la causa última del aborto temprano de la semilla es una reducción en el número cromosómico del

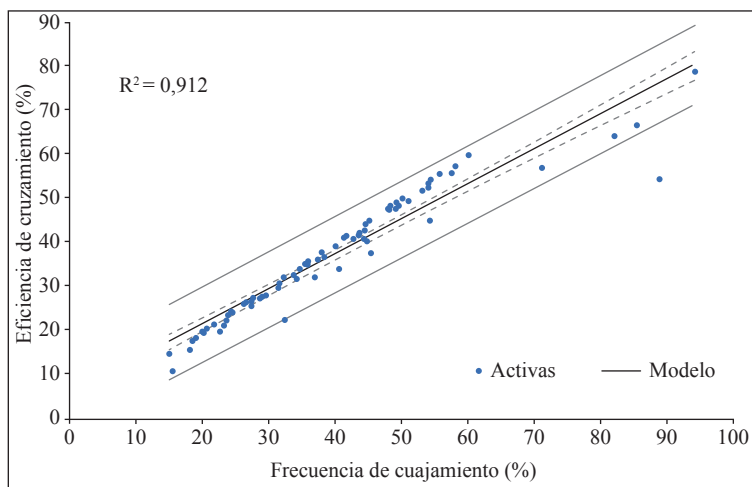


Figura 4. Análisis de regresión entre la eficiencia de cruzamiento y la frecuencia de cuajamiento de los cruces intra-específicos estudiados.

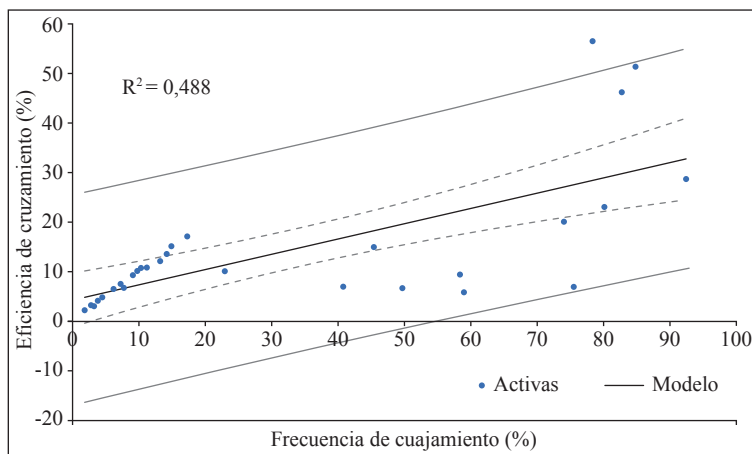


Figura 5. Análisis de regresión entre la eficiencia de cruzamiento y la frecuencia de cuajamiento de los cruces inter-específicos estudiados.

tejido del endospermo, que afecta directamente su viabilidad. Estudios realizados sobre un gran número de híbridos interespecíficos de café sugieren que el desarrollo normal del endospermo, e indirectamente del embrión híbrido, estaría condicionado por una dosis mínima de genoma parental (materno y/o paterno), en los diferentes tejidos que componen la semilla (15).

A pesar de estos problemas, los híbridos triploides entre *C. arabica* x *C. liberica* son capaces de formar algunas semillas. Esto se

explica por la presencia de compatibilidad genética no despreciable entre los genomas de las dos especies, tal como lo muestran los niveles importantes de apareamiento cromosómico observado al estudiar la meiosis de diferentes híbridos triploides (3, 23). Esto ha sido confirmado recientemente usando técnicas citogenéticas de hibridación cromosómica (12).

Entre los cruces intraespecíficos se observó coherencia entre las variables evaluadas y el nivel de introgresión de los

progenitores masculinos (Figuras 2 y 3). Así, para los cruces con S.288 se observaron porcentajes de cuajamiento y eficiencias de cruzamiento significativamente menores ($p < 0,05$), con respecto a los obtenidos con los genotipos S.795 y BA-2, considerados menos introgresados que éste. La variedad S.288 es derivada de autofecundaciones y selecciones de la línea S.26, procedente a su vez de un híbrido natural entre *C. arabica* x *C. liberica* (16). Estimaciones realizadas con base en estudios moleculares de la introgresión del S.288 (19), muestran que este genotipo ha introgresado al menos medio cromosoma de la especie *C. liberica*, el cual estaría representado en fragmentos presentes en dos o tres de sus cromosomas. En otras palabras, al menos 4,5% de su genoma estaría introgresado por *C. liberica*. Por su parte, tanto BA-2 como S.795, corresponden a líneas que fueron seleccionadas a partir de poblaciones derivadas de retrocruzamientos entre S.288 con la variedad Kent de *C. arabica* (16, 17). Por lo anterior, es razonable pensar que sus niveles de introgresión son menores al de la selección S.288 de la cual se derivan.

En general, la eficiencia de la polinización manual observada en este trabajo para *C. arabica* es superior a la observada previamente para la especie *C. canephora* (61,9% vs 25% a 40%), usando una metodología similar. Al igual que en *C. arabica*, en *C. canephora* el éxito de las polinizaciones está determinado, entre otras causas, por la época del año y las diferencias genéticas entre los clones usados como progenitores (4).

Efecto de los factores climáticos sobre la polinización manual

En este estudio se comparó la eficiencia de la polinización manual en dos periodos diferentes. Para ello, se analizaron cuatro cruzamientos interespecíficos que involucraron al híbrido Kawisari y a la especie *C. liberica* (Tabla 3). El análisis estadístico mostró que la frecuencia de cuajamiento entre un mes y otro varió de manera significativa ($p < 0,05$) en dos de los cuatro cruzamientos analizados. Para los cruces con Kawisari, la frecuencia de cuajamiento osciló entre 75,3% y 92,9%, mientras que para los cruces con *C. liberica* estos valores estuvieron entre 58,9% y 88,2%.

Tabla 3. Comparación de la frecuencia de cuajamiento y la eficiencia de cruzamiento correspondientes a las polinizaciones realizadas en enero y febrero de 2011, involucrando cuatro cruzamientos inter-específicos con la especie *C. liberica*.

Cruzamiento	Época ^{1/}	Frecuencia de cuajamiento (%)	Significancia ^{2/}	Eficiencia de cruzamiento (%)	Significancia ^{2/}
Línea CX-2848 x Kawisari Int. No.409	Ene 2011	79,2	0,032 *	59,1	0,004 **
	Feb 2011	92,9		28,1	
Línea CU-1843 x Kawisari Int. No.1409	Ene 2011	82,5	0,196	46,0	<0,000 **
	Feb 2011	75,3		18,9	
Línea CX-2710 x <i>C. liberica</i> (No. 21-25)	Ene 2011	77,8	0,361	23,1	0,005 **
	Feb 2011	75,5		5,7	
Línea CU-1827 x <i>C. liberica</i> (No. 21-25)	Ene 2011	88,2	0,004 **	53,2	<0,00 **
	Feb 2011	58,9		11,1	

^{1/} Período en el cual se realizó la polinización artificial

^{2/} Valor de probabilidad según prueba de t para muestras con varianza desigual

*, **, Valores significativamente diferentes a un nivel de confianza del 95% y del 99%, respectivamente.

La eficiencia de cruzamiento por su parte mostró diferencias significativas ($p < 0,01$) entre las dos épocas, para todos los cruces estudiados, sugiriendo que independientemente del componente genético (es decir, nivel de introgresión entre los progenitores), existe un efecto consistente de las condiciones climáticas sobre esta variable. Las eficiencias de cruzamiento estuvieron entre 18,9% y 59,1% para los cruces con Kawisari, mientras que para los cruces con *C. liberica* estos valores variaron entre 5,7% y 53,2%.

El análisis de la temperatura, brillo solar y precipitación imperante en los meses de enero y febrero del 2011, mostró diferencias particularmente marcadas para el brillo solar y la precipitación (Tabla 4). Mientras el brillo solar descendió en promedio 3 h.día⁻¹ entre enero y febrero, la precipitación media sufrió un incremento de diez veces pasando de 1 mm.día⁻¹ a 11 mm.día⁻¹. Al analizar detalladamente el comportamiento de la lluvia, se aprecia que durante los 5 días que precedieron a la polinización de febrero ocurrió un incremento marcado alcanzándose 97 mm acumulados, con relación al mismo periodo de enero 2011, cuando sólo se observaron 9 mm acumulados (Figura 6). De acuerdo con esto, es posible suponer que el incremento marcado de las lluvias justo antes de la polinización haya afectado la eficiencia de los cruzamientos,

independiente del efecto genético debido a la introgresión. Los resultados muestran una reducción significativa en la eficiencia de los cruzamientos como producto de las lluvias que se presentaron durante el mes de febrero del 2011. Es posible que los aguaceros torrenciales que ocurrieron días antes hayan afectado algunas flores de los árboles previamente preparados y hayan dificultado de manera importante la aplicación del polen durante la polinización. Si bien no se tomaron datos de las condiciones de humedad del polen previo a la polinización, es muy posible que el exceso de lluvias haya afectado el desarrollo normal del proceso de polinización. Estudios más precisos son necesarios para determinar de qué manera las condiciones de humedad estarían incidiendo en la dispersión y penetración del polen durante los cruzamientos.

Si bien no hubo diferencias importantes entre las dos épocas con respecto a las condiciones climáticas posteriores a la polinización, existe evidencia que muestra que los excesos de humedad, sombrío y/o temperatura, pueden llevar al secamiento de flores y frutos en estados muy tempranos, un disturbio que generalmente se asocia con el incremento de agentes patogénicos, como hongos del género *Colletotrichum* (1, 24), lo cual aparentemente no fue el caso en este trabajo.

Tabla 4. Condiciones climáticas imperantes en la Estación Central Naranjal (Chinchiná), durante las dos épocas de polinización (enero y febrero de 2011) comparadas en este trabajo. Para cada variable se presentan los valores promedios de 11 días (5 días antes, durante y 5 días después de la polinización).

Época	Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)	Brillo solar (h)	Precipitación (mm)
	Máx.	Mín.	Media			
Enero 2011	27,5	17,0	21,3	79 (74 - 83)	7 (3 - 10)	1 (0 - 5)
Febrero 2011	26,0	16,9	20,6	83 (72 - 92)	4 (1 - 9)	11 (0 - 61)

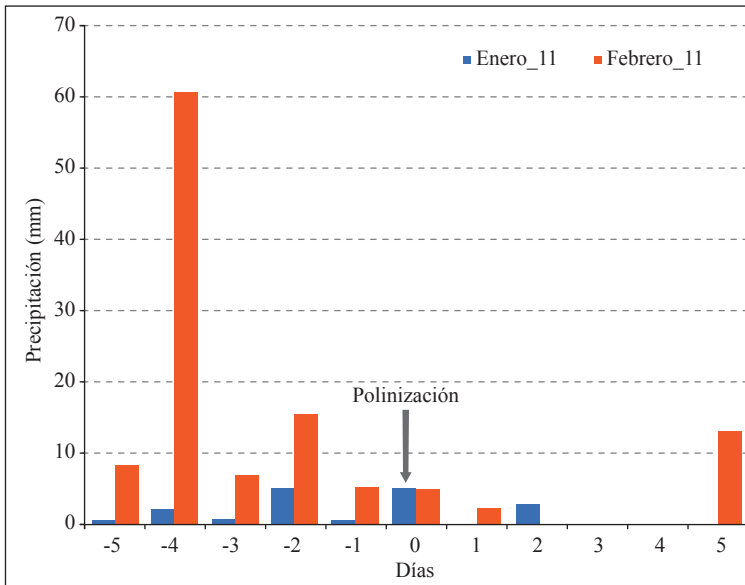


Figura 6. Comportamiento de la precipitación antes, durante y después de las polinizaciones realizadas en enero y febrero del 2011, en la Estación Central Naranjal (Chinchiná).

En conclusión, en este estudio se puso en evidencia el efecto de la introgresión tanto sobre la frecuencia de cuajamiento de las flores como sobre la eficiencia de los cruzamientos realizados. El conjunto de resultados muestra que a mayor introgresión de la especie *C. liberica*, menor es la eficiencia de los cruzamientos con genotipos arabigos. Los genotipos BA-2 y S.795 fueron los que mostraron una mayor compatibilidad con los Catimores usados como progenitores femeninos, mientras que el S.288 presentó un comportamiento intermedio. Igualmente, se evidenció que la eficiencia del cruzamiento se relaciona de manera directa con la frecuencia de cuajamiento observada un mes después de la polinización, excepto en los cruzamientos interespecíficos, en los cuales se presenta una reducción significativa de la eficiencia posterior al cuajamiento, producto del aborto prematuro de los frutos en sus primeras etapas de formación.

Si bien en este trabajo se analizaron poblaciones introgresadas por *C. liberica*,

este mismo comportamiento puede esperarse que ocurra para cruzamientos entre *C. arabica* y otras especies diploides. Los trabajos pioneros realizados por Charrier (7) y Le Pierrès (15), entre otros, sugieren que los cruzamientos interespecíficos involucrando otras especies como *C. canephora*, *C. eugenioides*, *C. congensis*, *C. kapakata* o *C. stenophila*, muestran un comportamiento meiótico muy parecido, lo que se traduce en valores de fertilidad igualmente similares. Al comparar el número de conjugaciones meióticas bivalentes en híbridos triploides entre estas especies y *C. arabica*, se observan en promedio 8 a 10 configuraciones de este tipo, lo que hace suponer la existencia de homologías genéticas no despreciables entre los cromosomas de estas especies. Dada la proximidad genética de las diferentes especies de café (3, 7, 23), es de suponer que las variaciones en fertilidad podrían estar más relacionadas con diferencias estructurales que con diferencias genéticas entre los cromosomas de las especies involucradas.

Finalmente, la comparación de diferentes cruzamientos realizados bajo las condiciones de Chinchiná, en dos meses contrastantes por la presencia de precipitaciones, mostró que la lluvia puede llegar a ser un factor limitante que afecta el buen desarrollo de los cruzamientos y su eficiencia. En este sentido, sería importante que al momento de planear jornadas de polinización, se tenga en cuenta el efecto que la alta pluviosidad puede tener sobre el éxito final de los cruzamientos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Señor Augusto Vera de la Disciplina de Mejoramiento Genético por su colaboración en la realización de los cruzamientos y el suministro oportuno de los datos de campo, así como al Señor Luis G. Henao de la Disciplina de Agroclimatología, por el suministro de los datos climáticos.

LITERATURA CITADA

1. ARCILA, J. Anormalidades en la floración del café. Chinchiná : Cenicafé, 2004. 8 p. (Avances Técnicos No. 320).
2. BERTHAUD, J. L'incompatibilité chez *Coffea canephora*: Méthode de test et déterminisme génétique. Café cacao, thé 24:267-274. 1980.
3. BERTHAUD, J.; CHARRIER, A. Genetic resources of *Coffea*. p. 1-42. En: CLARKE, R.J.; MACRAE, R. Coffee. London : Elsevier applied science, 1988. 334 p.
4. CAPOT, J. L'amélioration du caféier Robusta en Côte d'Ivoire. Café cacao, thé 21:233-244. 1977.
5. CARVALHO, A. Principles and practice of coffee plant breeding for productivity and quality factors: *Coffea arabica* L. p. 129-166. En: CLARKE, R.J.; MACRAE, R. Agronomy. London : Elsevier applied science, 1988. 334 p.
6. CARVALHO, A.; MÓNACO, L.C. The breeding of arabica coffee. p. 198-202. En: FERWERDA, F.P.; WIT, F. Outlines of perennial crop breeding in the tropics. Wageningen : Veenman & Zonene, 1969.
7. CHARRIER, A. La structure génétique des caféiers spontanés de la région malgache (Mascarocoffea): Leurs relations avec les caféiers d'origine africaine (Eucoffea). Paris : ORSTOM, 1978. 224 p.
8. CRAMER P., J.S. A review of literature of coffee research in Indonesia. Turrialba : IICA, 1957. 262 p.
9. DEMARLY, Y. Génétique et amélioration de plantes. Paris : Masson publish, 1977. 287 p.
10. JIMÉNEZ, W.; CASTILLO, J. Observaciones sobre la polinización de *Coffea arabica* L., en la zona cafetera central de Colombia. Cenicafé 27:51-66. 1976.
11. HERRERA P., J.C.; COMBES, M.C.; CORTINA G., H.A.; ALVARADO A., G.; LASHERMES, P. Gene introgression into *Coffea arabica* by way of triploid hybrids (*C. arabica* x *C. canephora*). Heredity 89:488-494. 2002.
12. HERRERA P., J.C.; ROMERO, J.V.; CAMAYO, G.C.; CAETANO, C.M.; CORTINA, H. Evidence of intergenomic relationship in triploid hybrids of coffee (*Coffea* sp.) as revealed by meiotic behavior and genomic in situ hybridization. Tropical plant biology 5(3):207-217. 2012.
13. KLEIN, A.M.; VAISSIÈRE, B.E.; CANE, J.H.; DEWENTER, I.S.; CUNNINGHAM, S.A.; KREMEN, C.; TSCHARNTKE, T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. Proceedings of the royal society of biological sciences 274:303-313. 2007.
14. KRUG, C.A. Controle da polinização nas flores do cafeeiro. Sao Paulo : Instituto agronômico de Campinas, 1935. 12 p. (Boletín Técnico No. 15).
15. LE PIERRES, D. Etude des hybrides interspécifiques tétraploïdes de première génération entre *Coffea arabica* et les caféiers diploïdes. Paris : Université Paris, 1995. 298 p. Thèse doctorat.
16. NARASIMHASWAMY, R.L. Arabica selection S.795 its origin and performance: A study. Indian coffee research 24:197-204. 1960.
17. NARAYANAN, B.T. Sixth and seventh annual reports of the research department of the Indian coffee board (1952-53, 1953-54). Karnataka : Coffee board, 1954. 91 p.

18. POSKIN, J.H. Etude d'un hybride Robusta-Arabica. p. 419-423. En: Semaine agricole Yangambi: C.R. Congo : Institut national agronomique, 1947.
19. PRAKASH, N.S.; MARQUES, D.V.; VARZEAV, M.P.; SILVA, M.C.; COMBES, M.C.; LASHERMES, P. Introgression molecular analysis of a leaf rust resistance gene from *Coffea liberica* into *C. arabica* L. Theoretical and applied genetics 109:1311-1317. 2004.
20. RICHARDSON, A.C.; ANDERSON, P.A. Hand pollination effects on the set and development of cherimoya (*Annona cherimola*) fruit in a humid climate. Scientia horticulturae 65:273-281. 1996.
21. SALAZAR, M.R.; ARCILA, J.; RIAÑO, N.; BUSTILLO, A.E. Crecimiento y desarrollo del fruto de café y su relación con la broca. Chinchiná : Cenicafé, 1993. 4 p. (Avances Técnicos No. 194).
22. STOFFELS, E. La sélection du caféier arabica a la station de Mulungu. Congo : INEAC, 1936. 41 p.
23. SYBENGA, J. Genetics and cytology of coffee: A literature review. p. 209-3016. En: MARTINUS, N. The Hague. Turrialba : IIAS, 1961.
24. VALENCIA, G.; ARCILA, J. Secamiento y caída de frutos tiernos de café. Chinchiná : Cenicafé, 1975. 2 p. (Avances Técnicos No. 40).
25. WALYARO, D.J.; VAN DER V., H. Pollen longevity and artificial cross-pollination in *Coffea arabica* L. Euphytica 26:225-231. 1977.
26. WERTHEIM, S.J. Methods for cross pollination and flowering assessment and their interpretation. Acta horticulturae 423:237-239. 1996.

ESTUDIO DE LA DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y MOLECULAR DEL GERMOPLASMA DE *Coffea liberica* BULL EX HIERN EN COLOMBIA

Ifigenia Hurtado*; Juan Carlos Herrera Pinilla*

HURTADO, I.; HERRERA P. J. C. Estudio de la diversidad morfológica y molecular del germoplasma de *Coffea liberica* bull ex hiern en Colombia. Revista Cenicafé 64 (2): 31-47. 2013

El objetivo de este estudio fue evaluar la variabilidad genética tanto intra- como inter-poblacional entre las diferentes accesiones de *Coffea liberica* que hacen parte de la Colección Colombiana de Café (CCC) de Cenicafé, mediante el uso de descriptores morfológicos y marcadores moleculares. Se evaluaron 56 accesiones pertenecientes a seis poblaciones, usando 17 descriptores cuantitativos, cuatro índices morfológicos y seis descriptores cualitativos específicos para café. Paralelamente se determinó el polimorfismo molecular generado por 40 marcadores iPBS (*inter-primer binding site*). Más de la mitad de los descriptores morfológicos mostraron diferencias significativas entre las accesiones, pero solo aquellas relacionadas con el tamaño del fruto fueron discriminantes entre las poblaciones de Libéricas y Excelsas. Los marcadores iPBS generaron un promedio de 13,8 bandas por locus, con un máximo de 24. Aunque solo el 32,5% de los marcadores resultaron polimórficos, éstos se revelaron altamente variables con una frecuencia de loci polimórficos de 78,6% en Libéricas y de 71,4% en Excelsas, mientras que los porcentajes de heterocigocidad alcanzaron valores de 0,288 y 0,286, respectivamente. La mayor parte de la varianza genética observada (99%) se explicó por el polimorfismo entre accesiones, en detrimento del polimorfismo entre poblaciones. La elevada variabilidad intra-poblacional revelada en *C. liberica*, se constituye en una fuente importante de genes para la especie cultivada *C. arabica*, la cual puede ser explotada a través de puentes genéticos por la vía del retrocruzamiento. Este es el primer estudio exhaustivo sobre la diversidad del germoplasma de una especie diploide en Colombia.

Palabras clave: Hibridación interespecífica, Especies diploides, Colección de germoplasma, Polimorfismo molecular, Heterocigosis.

STUDY ON THE MORPHOLOGICAL AND MOLECULAR DIVERSITY OF *Coffea liberica* BULL EX HIERN GERMOPLASM IN COLOMBIA

Genetic variation in species related to *Coffea arabica* L. represents the main source of genes for the cultivated arabica coffee. Therefore characterization and evaluation of germplasm collections seeking traits with agronomic interest remain a priority for almost all breeding programs around the world. The aim of this study was to evaluate the intra- and inter-population variability of the different accessions of the *C. liberica* species present in the coffee germplasm collection of Cenicafé, using both morphological descriptors and molecular markers. A total of 56 accessions from 6 different *C. liberica* populations were evaluated through 17 quantitative and 6 qualitative coffee descriptors, as well as 4 morphological indexes. Similarly, molecular polymorphism was investigated using 40 inter-primer binding site (iPBS) markers. Although most of the morphological descriptors exhibited differences among accessions, only those related to the fruit size allow us to differentiate among the two main taxonomic groups: *Libericas* and *Excelsas* (i.e. *Dewevrei*). The 32.5% of the iPBS markers were polymorphic and unexpectedly variable, exhibiting 13.8 bands per locus, with a maximum of 24. The number of polymorphic loci varied from 78.6 in *Libericas* to 71.4 in *Excelsas*, while the percentages of heterozygosity attained 0.288 and 0.286, respectively. Most of the observed variance (99%) was due to intrinsic genetic variation among accessions rather than among populations. The elevated intra-population variability revealed here could be exploited by generating genetic bridges to the cultivated *C. arabica* throughout a backcross strategy. This study represents the first comprehensive description of the germplasm diversity of one diploid coffee species in Colombia.

Keywords: Interspecific hybridization, Diploid species, Germplasm collection, Molecular polymorphism, Heterozygosis.

* Investigador Asociado (hasta septiembre de 2012) e Investigador Científico III, respectivamente, Disciplina de Mejoramiento Genético, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas Colombia.

La elevada susceptibilidad a plagas y enfermedades que caracteriza a la especie cultivada *Coffea arabica* es una consecuencia de la estrecha base genética que posee la especie. La búsqueda de variabilidad genética útil, con propósitos de mejoramiento, solo es posible si se cuenta con una colección de germoplasma caracterizada, que permita identificar y posteriormente transferir los caracteres de interés agronómico a los nuevos genotipos mejorados.

En el continente americano, el género *Coffea* está representado en tres colecciones de germoplasma importantes (4). La primera se encuentra en Brasil y es mantenida por el Instituto Agronómico de Campinas, IAC; la segunda está en Costa Rica, en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE; y la tercera se localiza en Colombia, y está a cargo del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé.

La Colección Colombiana de Café (CCC) de Cenicafé fue creada en 1940, y está representada por más de 1.000 accesiones o entradas, de las cuales el 87% (956) pertenecen a la especie *Coffea arabica*. El porcentaje restante incluye nueve especies diploides, siendo la especie *C. canephora* la que se encuentra mejor representada, con 98 accesiones (8,8%), seguida de la especie *C. liberica* con 19 (1,7%). Adicionalmente se tienen 18 híbridos interespecíficos introducidos, de origen tanto natural como artificial, que completan el grupo de materiales disponibles (31). Si bien esta colección ha sido objeto de varios estudios, solo el germoplasma silvestre de *C. arabica*, representado por introducciones de Etiopía, ha sido evaluado intensivamente, debido al interés particular que éste tiene para el mejoramiento de las variedades cultivadas (11, 12, 15, 27, 28, 32). Dentro de la limitada muestra de especies diploides relacionadas con *C. arabica*, solo *C.*

canephora ha sido utilizada para el desarrollo de nuevas líneas mejoradas, sea a través de los híbridos triploides (37) o por duplicación previa del parental diploide (10). En Cenicafé se ha beneficiado la primera estrategia. Es así como a partir de la década de 1970 se empezó a trabajar en el desarrollo de un número importante de híbridos triploides, los cuales luego de uno o dos retrocruzamientos dieron origen a progenies avanzadas con excelentes características agronómicas. Producto de este trabajo, actualmente se tiene un número importante de líneas que ofrecen elevada resistencia a enfermedades como la roya del cafeto (*Hemileia vastarix*) o la llaga macana (*Ceratocystis* sp.), excelente producción y muy buena calidad en taza (2, 13, 14, 36).

Aunque menos conocida que *C. canephora*, la especie *C. liberica* constituye otra fuente de mucha importancia para el mejoramiento de *C. arabica*. Si bien existen reportes de sus características generales, su poca utilización en los programas de mejoramiento se explica en buena parte por el desconocimiento y poca representatividad que existe de esta especie en las colecciones internacionales. Esta especie fue descrita originalmente en 1876, usando como tipo una planta proveniente de Sierra Leona (África Occidental). Aunque sus frutos producen un café de aceptable calidad, su importancia comercial está restringida a mercados muy locales, de unos pocos países Africanos, en donde tuvo un auge relativamente importante entre 1930 y 1950 (4).

Al igual que *C. canephora*, *C. liberica* pertenece al grupo de especies de la sección Guineo-Congolesa, cuya distribución geográfica comprende una amplia región de África Central y Occidental (6, 18, 30). Desde el punto de vista altitudinal, *C. liberica* se distribuye desde los 80 hasta los 1.800 m, preferiblemente en zonas de bosques

húmedos (5). Su apariencia es particularmente variable, encontrándose arbustos de 5 m hasta grandes árboles que pueden llegar a los 15 m de altura. Sus hojas son grandes y muy coriáceas, llegando a medir hasta 35 cm de longitud. Los frutos son gruesos, de coloraciones rojas muy variadas, generalmente dispuestos en grupos de hasta 15 cerezas por verticilo (16).

Diferentes estudios han encontrado elevados contenidos de ácidos clorogénicos en *C. liberica*, las cuales desempeñan un papel importante en la producción de aromas en la bebida (3). Además, se sabe que posee resistencia genética contra la roya, tolerancia elevada al ataque de nematodos y buena resistencia a las bajas temperaturas (5). Recientemente se ha encontrado que las semillas de *C. liberica* poseen un mecanismo de antibiosis que parece estar limitando la oviposición de la broca, *Hypothenemus hampei* Ferrari (20, 42), la mayor plaga conocida de este cultivo en el mundo.

Conscientes de la importancia potencial de *C. liberica* para el mejoramiento de la especie cultivada *C. arabica*, el presente estudio tuvo como objetivos: (i) Determinar la variabilidad morfológica y molecular existente entre las diferentes accesiones de esta especie contenidas en la colección de germoplasma de Cenicafé; e (ii) Identificar y caracterizar las relaciones genéticas que existen entre los principales grupos o poblaciones representados en ella.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal. Los individuos de *C. liberica* que hacen parte de la CCC, se encuentran sembrados en la Estación Central Naranjal (municipio de Chinchiná, Caldas). De acuerdo con los registros de la Colección, se trata de árboles adultos,

pertenecientes a 19 accesiones, representadas cada una por uno a cinco clones, que fueron introducidos al país entre 1947 y 1964 (Figura 1). En una primera etapa del estudio se verificó la numeración y el estado general de cada árbol, con el fin de seleccionar las accesiones que presentaban al menos dos árboles en los cuales se realizaría la evaluación. A partir de esta información, se seleccionaron 56 árboles pertenecientes a 18 accesiones (Tabla 1), las cuales de acuerdo con su registro de entrada a la colección, fueron separadas en seis poblaciones o grupos taxonómicos, así: Libérica, Excelsa, Abeokutae, Neoarnoldiana, Pasypagor y Aruwinensis.

Evaluación de descriptores morfológicos cuantitativos. La caracterización morfológica de las plantas de *C. liberica* se basó en 17 descriptores establecidos por el Instituto Internacional de Recursos Filogenéticos, IPGRI (21), como discriminantes para especies de los géneros *Coffea* y *Psilanthus*. La siguiente es la lista de descriptores, seguida por su sigla:

1. Longitud de la hoja (LH)*
2. Ancho de la hoja (AH)*
3. Longitud del pecíolo foliar (LPF)*
4. Longitud de la arista de la estipula (LAE)*
5. Número de flores por fascículo (NFF)
6. Número de fascículos por nudo (NFN)
7. Número de pétalos por flor (NPF)
8. Número de estambres por flor (NEF)
9. Tamaño del botón floral (TBF)*
10. Longitud del fruto (LF)*
11. Ancho del fruto (AF)*
12. Espesor del fruto (EF)*
13. Largo del disco del fruto (LDF)*
14. Ancho del disco del fruto (ADF)*
15. Longitud de la semilla (LS)*
16. Ancho de la semilla (AS)*
17. Espesor de la semilla (ES)*

* Para estos descriptores, las mediciones fueron realizadas con un nonio de precisión y expresadas en milímetros (mm).

Adicionalmente, se estimaron los siguientes índices:

18. Índice de forma de la hoja (LH/AH)
19. Índice de área foliar (LH x AH)
20. Índice de forma del fruto (LF/AF)
21. Índice de volumen del fruto (LDF x ADF x EF)

Como complemento a este estudio morfológico, se consideraron seis descriptores cualitativos, los cuales se calificaron según las categorías previamente establecidas (21), así:

1. Forma de la hoja (FH): (a) obovada; (b) ovada; (c) elíptica; (d) lanceolada; (e) otra.
2. Forma del ápice de la hoja (FAH): (a) redonda; (b) obtusa; (c) aguda; (d) puntiaguda; (e) apiculada; (f) espatulada; (g) otra.
3. Forma de la estípula (FE): (a) redonda; (b) oval; (c) triangular; (d) deltoide; (e) trapeciforme; (f) otra.
4. Color del fruto (CF): (a) amarillo; (b) amarillo naranja; (c) naranja; (d) naranja rojizo; (e) rojo; (f) rojo púrpura; (g) púrpura; (h) púrpura violeta; (i) violeta; (j) negro; (k) otro.
5. Forma del fruto (FF): (a) redondeada; (b) obovada; (c) oval; (d) elíptica; (e) oblonga; (f) otra.
6. Forma del disco del fruto (FDF): (a) no marcada; (b) marcada pero no prominente; (c) prominente; (d) picuda.

Estudio de la variación molecular. Para los análisis del polimorfismo molecular, se extrajo ADN genómico total de cada uno de los 18 individuos pertenecientes a igual número de accesiones, las cuales representaron las seis poblaciones de estudio. Para la extracción se partió de tejido foliar joven y se utilizó el kit de extracción *DNeasy Plant Maxi Kit* (Qiagen®). Todas las muestras de ADN fueron diluidas a una concentración final de 25-50 ng.µL⁻¹.

El polimorfismo molecular se evaluó usando marcadores iPBS (*inter-Primer Binding Site*), los cuales corresponden a una nueva generación de marcadores propuestos por Kalendar *et al.* (22) desarrollados a partir de secuencias conservadas de regiones internas del gen que codifica para la enzima transcriptasa reversa (*TR*), propia de elementos repetitivos transponibles de las familias *Gypsy* y *Copia*. La amplificación de los marcadores es favorecida por la presencia de estos sitios internos de anclaje, denominados también *inter-PBS*, (*primer binding sites*), generando un elevado polimorfismo. Gracias a la abundancia de los retrotransposones en el genoma de las plantas y los animales, los iPBS son una manera rápida y eficiente de analizar el polimorfismo molecular en especies que carecen de información genómica previa. En el presente trabajo, se evaluó por primera vez el potencial de los iPBS para el estudio de la variabilidad molecular en una especie de café diploide.

En total, se evaluaron 40 combinaciones iPBS, repartidas en: Diez combinaciones de *primers* cortos (con 12 ó 13 nt) y diez de *primers* largos (con 18 nt), todas ellas reportadas por Kalendar *et al.* (22). Para la amplificación PCR y la visualización de bandas se siguieron las indicaciones del autor, con mínimas modificaciones. Se utilizaron entre 50 y 100 ng de ADN total por muestra. Los ciclos de amplificación PCR consistieron en: Una fase de denaturación inicial a 95°C por 3 min., seguido de 28 a 30 ciclos compuestos de una denaturación a 95°C por 15 s, una fase de anillamiento a 50-60°C por 60 s, y una de extensión a 68°C por 60 s, finalizando con una extensión adicional a 72°C por 5 min. La visualización del polimorfismo se hizo utilizando geles de agarosa (1,7%) de alta pureza (*Ultrapure TM Agarose* Ref.15510-027, Invitrogen®). Para lograr una máxima resolución, se fabricaron



Figura 1. Fenotipo de algunas de las accesiones de *C. liberica* que hacen parte de la Colección Colombiana de Café. **a.** ejemplar de *C. liberica* var. *Excelsa* CCC1028; **b.** Ramas productivas de esta misma variedad. **c.** Árbol de una población de *Abeokuta*.

geles de 20 x 25 cm, los cuales fueron corridos por espacio de 10 a 12 h, usando 70 voltios de corriente. La visualización de las bandas se hizo mediante un transiluminador tipo Image Master VDS FUJIFILM FTI-500.

Análisis de datos. Con el fin de determinar diferencias entre las accesiones de *C. liberica* con respecto a cada una de las variables cuantitativas e índices morfológicos relacionados con hojas, frutos, disco del fruto y semillas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), considerando cada introducción como la unidad experimental.

La cercanía entre individuos se determinó con base en una matriz normalizada derivada de los datos morfológicos, a partir

de la cual se estimaron los respectivos coeficientes de similitud de DICE (44), mediante el programa NTSYS (*Numerical Taxonomy System for personal Computer*, versión 2.10p). Seguidamente se construyó un dendrograma, usando el método de agrupamiento UPGMA, basado en los promedios aritméticos no ponderados.

El análisis de la variabilidad molecular se realizó con base en los perfiles de segregación de los marcadores iPBS que resultaron polimórficos. Con esta información se generó una matriz binaria (presencia-ausencia), a partir de la cual se estimaron las distancias genéticas mediante el coeficiente de similitud de DICE (34). Adicionalmente, y usando el método UPGMA, se agruparon las seis

Tabla 1. Acciones de la especie *Coffea liberica* presentes en la Colección Colombiana de Café (CCC).

Grupo, cultivar, poblaci3n	Accesi3n c3digo	Origen (Año de entrada)	No. de plantas
Libérica	CCC 769	Desconocido (1947)	4
Libérica	CCC 1032	Nigeria (1947)	5
Libérica	CCC 1033	Filipinas (1974)	2
Libérica	CCC 1034	Ceilán (1974)	3
Libérica	CCC 1035	Malasia (1974)	4
Libérica	CCC 1036	África Occidental (1974)	2
Excelsa	CCC 1026	Desconocido (1969)	4
Excelsa	CCC 1027	El Salvador (1969)	4
Excelsa	CCC 1028	Filipinas (1969)	5
Excelsa	CCC 1029	Ceilán (1969)	2
Excelsa	CCC 1030	África ecuatorial (1974)	3
Excelsa	CCC 1031	Madagascar (1974)	2
Abeokutae	CCC1022	Ceilán (1974)	4
Abeokutae	CCC 1024	Puerto Rico (1969)	2
Abeokutae Col 6	CCC 1023	Desconocido (1969)	1
Neoarnoldiana	CCC 1037	África ecuatorial (1969)	3
Pasypagor	CCC 1038	Ceilán (1974)	4
Aruwimiensis	CCC 1025	Ceilán (1969)	2

poblaciones estudiadas, con base en los coeficiente de disimilaridad de Nei (35).

Para investigar en detalle las diferencias entre los tres grupos más representativos de la especie *C. liberica*: los Excelsa, los Abeokutae y los Libérica, a partir de los datos moleculares se estimaron diferentes parámetros de diversidad poblacional: el índice de variabilidad (*Fst*) entre los grupos, así como el número de alelos (*Na*), el número de alelos efectivos (*Ne*), el porcentaje de heterocigosidad esperada (*He*), el índice de diversidad promedio poblacional de Shannon (*I*) y el porcentaje de polimorfismo para cada grupo. Estos parámetros se determinaron usando el programa GenAlEx 6.5 (38).

La partici3n de la variaci3n genética entre y dentro de grupos detectada por el análisis molecular, se realiz3 mediante un análisis de varianza molecular (AMOVA). Finalmente, se gener3 un dendrograma de similaridad entre

los tres grupos representativos de *C. liberica*, usando para ello las distancias mínimas de Nei (35). Las poblaciones se agruparon con ayuda del método UPGMA, considerando un mínimo de 1.000 permutaciones.

RESULTADOS Y DISCUSI3N

Caracterizaci3n morfol3gica de las poblaciones de *C. liberica*. El análisis de las variables cuantitativas mostr3 diferencias significativas ($p < 0,05$ y $p < 0,001$) entre accesiones, para 13 de las 17 variables evaluadas (Tabla 2). Esta variaci3n fue evidente a nivel de todas las partes de la planta analizadas, es decir, hojas, flores, frutos y semillas (Figuras 2 y 3). Al comparar los índices morfol3gicos entre poblaciones, se presentaron diferencias significativas relacionadas con el área foliar y la forma y volumen de los frutos (Tabla 3), mientras que la forma de las hojas y de las semillas fueron similares. Los Neoarnoldiana presentaron las

hojas más grandes, seguido de los Libéricas y los Excelsas, mientras que los Abeokutae tuvieron las hojas más pequeñas (Figuras 2d, 2e, 2f). Los frutos más alargados se presentaron en las accesiones de Abeokutae, mientras que los más grandes se encontraron entre los Libéricas y los Pasypagor. El grupo Aruwimiensis fue excluido de este análisis debido a la falta de datos (Figura 3).

Dentro de las variables cualitativas, se destaca la predominancia de accesiones con hojas elípticas, ápices apiculados, estípulas ovales y frutos redondeados. En general, el disco del fruto fue apenas marcado en la mayoría de accesiones, con la excepción de los Abeokutae y los Aruwimiensis que se destacaron por tener un disco muy prominente (Figuras 3a y 3d). Otro carácter que mostró diversidad entre accesiones fue el color del fruto (Figura 3), el cual varió entre el rojo, exhibido por los Abeokutae, pasando por el

rojo-púrpura de los Aruwimiensis, hasta el púrpura-violeta bastante generalizado entre los Excelsas y los Libéricas.

Al agrupar las accesiones por su distancia genética, estimada a partir de los datos morfológicos, no se observó una separación clara entre las accesiones pertenecientes a la misma población o grupo genético (datos no mostrados).

Diversidad molecular y proximidad genética. De los 40 iniciadores iPBS evaluados, solo 13 (32,5%) resultaron polimórficos (Tabla 4). De este grupo, cinco correspondieron a *primers* cortos (12 nt) mientras que ocho fueron largos (12-13 nt). La longitud de los *primers* no mostró relación con el número de bandas polimórficas. Este número varió entre seis, para el iniciador IPBS2373, y 24, para el iniciador IPBS2295. En total, el conjunto

Tabla 2. Caracterización morfológica de las introducciones de *C. liberica* presentes en la CCC.

Variables	Valor F	P > F	Significancia ^{1/}
1. Longitud de la hoja (LH)	1.412	0,245	NS
2. Ancho de la hoja (AH)	1.988	0,092	NS
3. Longitud del pecíolo foliar (LPF)	6.534	0,000	**
4. Longitud de la arista de la estípula (LAE)	0.806	0,626	NS
5. Número de flores por fascículo (NFF)	4.200	0,005	**
6. Número de fascículos por nudo (NFN)	3.376	0,013	**
7. Número de pétalos por flor (NPF)	8.402	0,000	**
8. Número de estambres por flor (NEF)	7.195	0,000	**
9. Tamaño del botón floral (TBF)	1.492	0,225	NS
10. Longitud del fruto (LF)	2.733	0,027	*
11. Ancho del fruto (AF)	2.467	0,041	*
12. Espesor del fruto (EF)	2.707	0,028	*
13. Largo del disco del fruto (LDF)	9.477	0,000	**
14. Ancho del disco del fruto (ADF)	11.137	0,000	**
15. Longitud de la semilla (LS)	6.704	0,000	**
16. Ancho de la semilla (AS)	3.932	0,004	**
17. Espesor de la semilla (ES)	5.092	0,001	**

^{1/} NS, diferencias no significativas entre accesiones; * significativas a $p < 0,05$; ** significativas a $p < 0,001$

Tabla 3. Variabilidad de las poblaciones de *C. liberica* con base en cinco índices morfológicos relacionados con las hojas, los frutos y las semillas.

Índice / Accesoión	Excelsa	Libérica	Abeokutae	Neoarnoldiana	Pasypagor
Forma de la hoja (LH / AH)					
Promedio (ns ^{1/})	2,2 a ^{2/}	2,2 a	2,4 a	2,1 a	2,2 a
Rango	1,7 - 2,6	1,8-2,6	1,8-2,9	2,0-2,3	2,1-2,3
Área foliar (LH x AH)					
Promedio - cm ² (*)	283,2 ab	293,1 ab	217,8 b	365,6 a	207,4 b
Rango	157,2- 403,5	154,2-374,7	165,7-273,2	284,9 – 429,1	192,6 – 230,6
Forma del fruto (LF / AF)					
Promedio (**)	1,1 b	1,0 b	1,2 a	1,1 ab	1,0 b
Rango	0,9 – 1,2	1,0 – 1,2	1,1 – 1,3	1,0 – 1,1	0,9 – 1,0
Volumen del fruto (LF x AF x EF)					
Promedio – cm ³ (**)	4,0 ab	5,2 a	4,8 ab	3,7 c	5,1 a
Rango	3,2 – 5,0	3,5 – 6,3	4,0 – 5,9	3,2 – 4,3	4,3 – 5,5
Volumen del fruto (LF x AF x EF)					
Promedio – cm ³ (**)	1,4 a	1,5 a	4,8 ab	1,5 a	1,4 a
Rango	1,2 – 1,6	1,3 – 1,8	4,0 – 5,9	1,4 – 1,7	1,3 – 1,4

^{1/} ns, diferencias no significativas entre genotipos; * significativas a $p < 0,05$; ** significativas a $p < 0,001$.

^{2/} Los tratamientos seguidos por la misma letra no presentan diferencias estadísticas significativas.

de marcadores iPBS permitió identificar 179 bandas polimórficas. La frecuencia de bandas polimórficas osciló entre 66,7% y 100%, encontrándose que ocho de los 13 marcadores presentaron frecuencias mayores al 80%.

La agrupación de las diferentes accesiones con base en las distancias genéticas estimadas a partir del polimorfismo de los marcadores iPBS, mostró una agrupación similar a la observada con base en la información morfológica, caracterizada por la presencia de grupos o *clusters* heterogéneos que no guardan correspondencia con el origen genético de las accesiones (Figura 4). Se destaca la separación clara de accesiones como Abeokutae1022, así como la agrupación de las accesiones Pasypagor1038 y Neoarnoldiana1037, en un *cluster* con 87% de similaridad.

Al agrupar las seis grandes poblaciones de *C. liberica* estudiadas (Figura 5), se observó que las poblaciones de Excelsas y Libéricas son más próximas entre sí, respecto a los Abeokutae. Además, hay una separación clara entre estos tres grupos y las poblaciones de Neoarnoldiana, Aruwimiensis y Pasypagor, siendo este último el más distante de todos.

Los índices de variación molecular entre los tres grupos más representativos de *C. liberica* en la colección, revelaron diferencias en el número de alelos efectivos y de loci polimórficos entre el grupo Abeokutae respecto a los Excelsas y los Libéricas (Tabla 5). Estos dos últimos grupos mostraron la variación más alta, como lo demuestran los mayores porcentajes de loci polimórficos, así como las mayores frecuencias de polimorfismo (>80%).

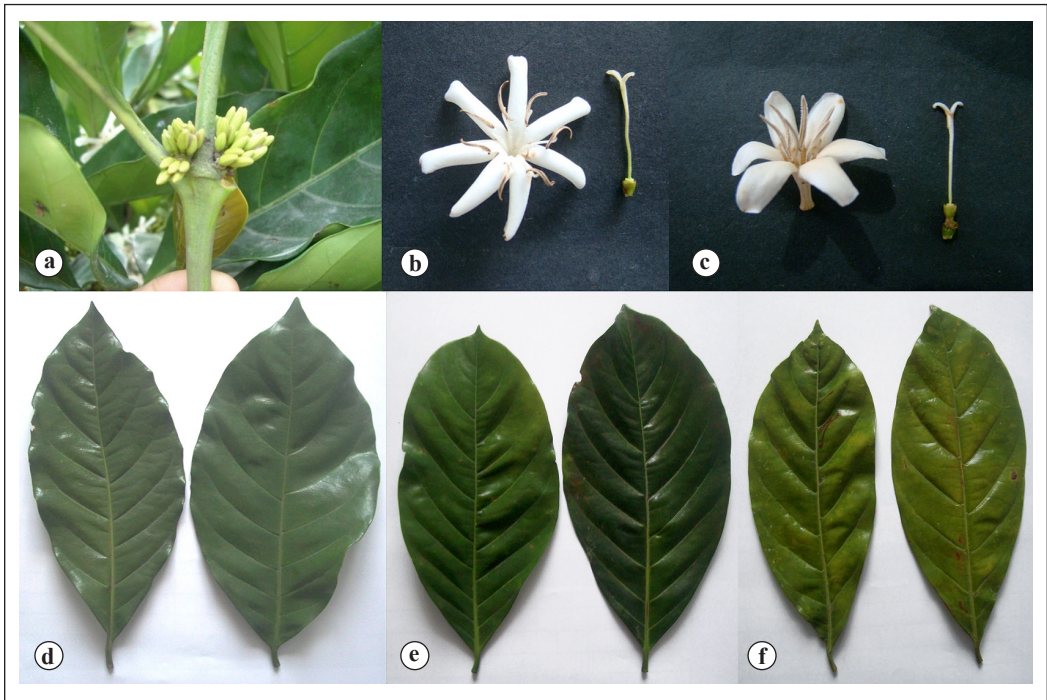


Figura 2. Variabilidad morfológica en flores y hojas de *C. liberica*. **a.** Yemas con botones florales en estado quiescente; **b.** y **c.** Flores abiertas de las variedades Excelsa y Libérica, respectivamente; **d.** Hojas adultas de una accesión de Nearnoldiana; **e.** Hojas adultas de Libérica; **F.** Hojas adultas de Pasypagor. Barra = 1 cm. apróx.

Estos valores se reflejaron también en un mayor número de alelos efectivos (N_e) en la población, mayores porcentajes de loci polimórficos, mayor heterocigocidad (H_e) y mayor polimorfismo (Tabla 5). Los índices de diversidad promedio de Shannon (I) para las poblaciones de Excelsas y Libéricas fueron de 0,4, mientras que para el grupo de los Abeokutae alcanzó un valor de 0,25.

Aunque estas diferencias son claras, debe tenerse en cuenta que los índices de diversidad pueden verse afectados tanto por las diferencias en el número de individuos disponibles por cada grupo (seis para Libéricas y Excelsas y tres para Abeokutae), como por el número de loci polimórficos utilizados, generando en algunos casos sub-estimaciones de la variación.

Finalmente, la partición de la variación genética entre y dentro de las poblaciones o grupos estudiados, estimada a partir de un análisis AMOVA de los datos derivados de los marcadores iPBS (Tabla 6), reveló que prácticamente toda la variabilidad genética observada (99%) es atribuible a las diferencias propias entre accesiones, mientras que sólo el 1% de ésta es explicada por las diferencias entre los grupos.

Coffea liberica es una especie que empezó a cultivarse en África mucho antes de la colonización europea. Numerosas subespecies, variedades, formas y razas fueron descritas en el pasado, sin embargo fue Lebrun (25), quien en 1941, propuso un nuevo agrupamiento de todas estas formas conocidas en dos variedades claramente



Figura 3. Variabilidad morfológica en frutos y semillas de *C. liberica*. **a.** Frutos de una accesión del grupo *Abeokutae*; **b.** Frutos de una accesión de *Pasypagor*; **c.** Semillas del grupo *Libérica* (arriba) y *Excelsa* (abajo); **d.** Frutos de una accesión de *Arawimensis*. La flecha blanca en **a** y **d**, muestra la posición y apariencia del disco del fruto.

separadas: *C. liberica* var. *liberica* que agrupaba los cafés tipo *Libérica* o *Liberiano* y *C. liberica* var. *dewevrei*, también conocido como cafés *Excelsa*. La elevada plasticidad genética de este último grupo, se tradujo en la existencia de muchos tipos intermediarios, que dieron origen a una proliferación importante de subgrupos con epítetos como, *Aruwimiensis*, *Arnoldiana*, *Neoarnoldiana* y *Abeokutae*, entre otros (40). De acuerdo con Bridson (8), la clasificación sugerida por Lebrun (25) parece ser la más adecuada y práctica desde el punto de vista taxonómico, ya que permite distinguir aquellas formas

silvestres y semi-silvestres de *C. liberica* de las altas montañas del Oeste de Uganda, de las formas cultivadas representadas por las variedades *Excelsa*. De acuerdo con esta clasificación, las formas conocidas por los cultivadores como café liberiano y café excelsa, estarían en el rango de variación definido para las variedades *Libérica* y *Dewevrei*, respectivamente. A pesar de ello, muchos autores reconocen que al interior de estos dos grupos o variedades, continúan existiendo muchas formas o tipos intermedios difíciles de clasificar (9, 17).

Tabla 4. Secuencia de los iniciadores iPBS y descripción del polimorfismo observado en las diferentes accesiones de *Coffea liberica*.

Marcador	Secuencia del iniciador	No. total de bandas	Frecuencia de bandas polimórficas (%)
IPBS2074	GCTCTGATACCA	19	84,2
IPBS2075	CTCATGATGCCA	7	71,4
IPBS2385	CCATTGGGTCCA	14	78,6
IPBS2079	AGGTGGGCGCCA	13	92,3
IPBS2375	TCGCATCAACCA	8	75
IPBS2253	TCGAGGCTCTAGATACCA	11	100
IPBS2257	CTCTCAATGAAAGCACCA	9	100
IPBS2373	GAACCTGCTCCGATGCCA	6	66,7
IPBS2224	ATCCTGGCAATGGAACCA	14	92,8
IPBS2237	CCCCTACCTGGCGTGCCA	15	93,3
IPBS2238	ACCTAGCTCATGATGCCA	16	93,7
IPBS2295	AGAACGGCTCTGATACCA	24	79,2
IPBS2298	AGAAGAGCTCTGATACCA	23	91,3

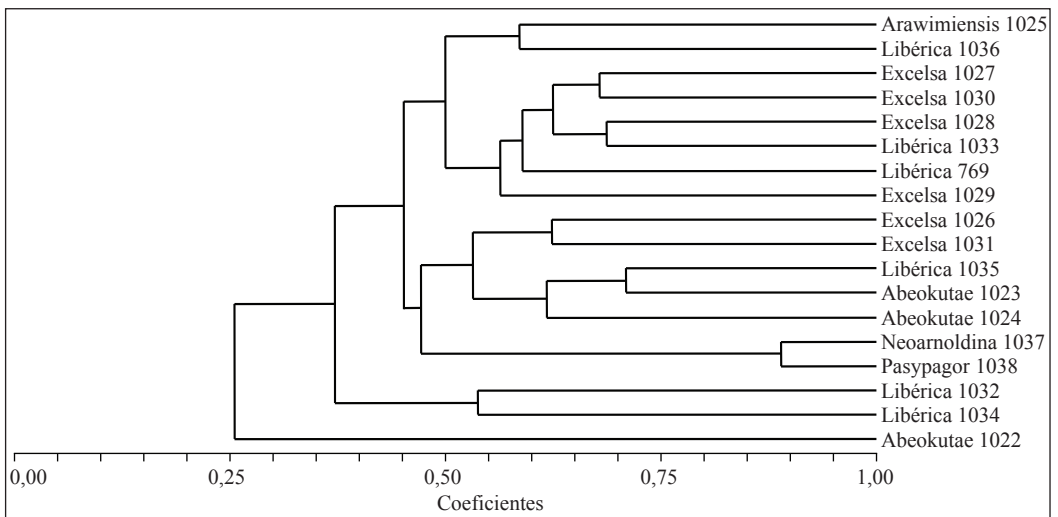


Figura 4. Dendrograma generado a partir de la segregación de 13 loci iPBS polimórficos para las 18 accesiones de *C. liberica* presentes en la CCC. Las distancias fueron estimadas a partir de los coeficientes de similitud de DICE.

El estudio de la variabilidad presente en las colecciones de germoplasma representa el primer paso para determinar sus posibilidades de uso en cualquier programa de mejoramiento a través de un esquema de hibridación interespecífica. Durante los últimos años, la

caracterización de los diferentes bancos de germoplasma de café alrededor del mundo, ha permitido la selección de múltiples genotipos, que posteriormente han sido usados como progenitores para el desarrollo de variedades locales (24).

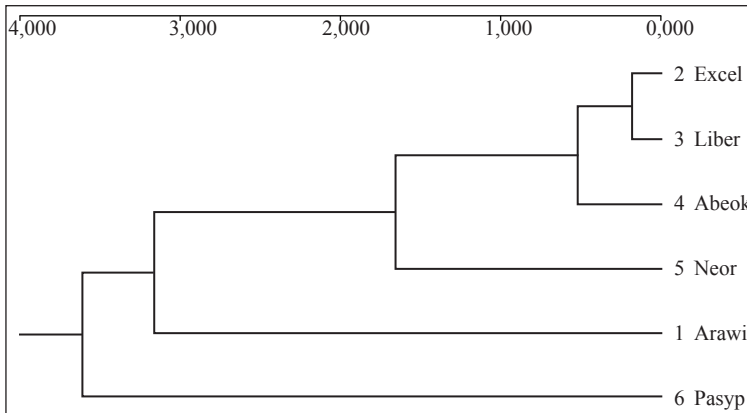


Figura 5. Dendrograma basado en la segregación de 13 loci iPBS polimórficos para las seis poblaciones de *C. liberica* representadas en la CCC. Las distancias fueron estimadas a partir de los coeficientes de similitud de DICE.

Tabla 5. Variabilidad genética estimada a partir del polimorfismo molecular observado en las tres poblaciones de *Coffea liberica* (por ejemplo, Libéricas, Excelsas y Abeokutae) más representativas de la CCC.

Población	No. alelos observados N_a	No. alelos efectivos N_e	Loci polimórficos %	Heterocigocidad esperada H_e	Polimorfismo %	Índice de Shannon I
Libérica	1.714	1.453	78,57	0,288	80,32	0,398
Excelsa	1.429	1.446	71,43	0,286	81,91	0,390
Abeokutae	1.214	1.296	42,86	0,203	62,23	0,248

Tabla 6. Análisis de varianza molecular (AMOVA) para las tres poblaciones analizadas, utilizando los datos obtenidos de once marcadores iPBS.

Fuente de variación	g.l. ^{1/}	SC ^{2/}	CM ^{3/}	Varianza estimada	Variación (%)
Entre poblaciones	2	6,350	3,175	0,042	1
Entre individuos	12	33,250	2,771	0,000	0
Dentro de individuos	15	49,500	3,300	3,300	99
Total	29	89,100		3,342	100

^{1/} g.l.: Grados de libertad; ^{2/} SC: Suma de cuadrados del error; ^{3/} CM: Cuadrado medio del error.

En este trabajo se presentan los resultados de la primera evaluación intensiva realizada al germoplasma de una especie diploide de la CCC. *C. liberica*, aunque sólo representa el 1,7% de las accesiones de la colección, es portadora de características de mucho interés para el mejoramiento de *C. arabica* como son: La resistencia a la roya del café (*Hemileia vastatrix*), la tolerancia a los nematodos (*Meloidogyne* spp.), a las bajas temperaturas o la baja oviposición de

la broca (*Hypothenemus hampei*) en sus frutos (1, 7, 19, 20, 41, 42).

Variabilidad morfológica inter e intrapoblacional. Inicialmente se evaluó la variación de múltiples caracteres morfológicos entre las diferentes accesiones de la especie *C. liberica* presentes en la CCC. La mayoría de ellos (>75%) mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para al menos una de las accesiones, reflejando la existencia de una variabilidad importante a nivel de

las diferentes accesiones que hacen parte de la colección.

Cuando se compararon los dos grupos más representativos de *C. liberica*: los Libéricas y los Excelsas (también denominados Dewevrei), se observó que sólo el tamaño del fruto permitió diferenciarlos. Este resultado concuerda con lo reportado por Bridson (8), quien estableció que ésta es la característica morfológica que mejor diferencia las dos variedades, siendo el tipo más grande, característico de Libérica. Según Bridson (8), otros atributos como el número de partes de la corola o el color de los frutos pueden también llegar a ser discriminantes, aunque no en todos los casos. Para N'Diaye *et al.* (33), las principales diferencias morfológicas entre estos dos grupos radican en el tamaño de las hojas, el número de inflorescencias por nudo (mayores en Dewvrei) y el tamaño del fruto (mayor en los Libéricas).

En este estudio, si bien la longitud del fruto no fue un carácter diferencial entre Libérica y Excelsa, sí lo fue el ancho del fruto (18,0 vs 16,5 mm, respectivamente). El número de pétalos por flor, aunque variable, no presentó diferencias significativas entre estos dos grupos, ni el color de los frutos. Aunque el ancho del disco del fruto no se considera un carácter taxonómico relevante para la diferenciación entre Libérica y Excelsa, sí parece serlo entre éstas y las formas Abeokutae, las cuales mostraron una distancia genética mayor con aquellas.

Considerando el conjunto de las seis poblaciones de *C. liberica* presentes en la CCC, cabe destacar que el grupo Neoarnoldiana presentó las hojas más grandes y los frutos más pequeños; mientras que los individuos pertenecientes a las poblaciones Libérica y Pasypagor, se distinguieron por presentar los frutos más grandes.

Polimorfismo molecular y eficiencia de los marcadores iPBS. En una de las primeras evaluaciones moleculares hechas a la CCC (28), se evaluó el polimorfismo generado por marcadores microsátélites en diferentes accesiones de *Coffea*, incluidas cinco especies diploides y 23 tetraploides. En promedio, se encontraron 3,6 alelos por locus en los diploides contra 2,5 en los arábigos silvestres, y solamente 1,9 en los arábigos cultivados. Las dos accesiones de *C. liberica* analizadas mostraron una elevada variación intraespecífica, con un coeficiente de similitud de 0,29, comparable al calculado para especies como *C. eugenioides* o *C. canephora*. En otro estudio similar Montoya *et al.* (29) estudiaron el potencial de diferentes marcadores microsátélites para la detección de polimorfismo en una muestra de especies diploides y tetraploides de la CCC, donde se incluyó *C. liberica*. Los resultados mostraron que este tipo de marcadores produjo en promedio 7,7 bandas polimórficas por locus, con un máximo de 20, siendo las especies diploides las que generaron mayor número de bandas y, por ende, de polimorfismo (PIC=0,77). En un tercer trabajo, se estudió el potencial de 110 microsátélites para ser transferidos a otras especies de café. La evaluación hecha sobre seis especies diploides, incluidas *C. canephora* y *C. liberica*, mostró una frecuencia de amplificación entre 72,7% y 82,4%, corroborando la importancia de estos marcadores para la caracterización de especies del género *Coffea* (39).

En el presente estudio, el uso de marcadores iPBS permitió obtener un alto polimorfismo en la especie *C. liberica*. En comparación con los estudios citados anteriormente, en los cuales se usaron marcadores microsátélites, los iPBS evaluados por primera vez en café tienen un alto potencial como herramienta para el estudio de la variabilidad del germoplasma. Su eficiencia radica en el hecho que permiten revelar un

polimorfismo asociado a inserciones puntuales de elementos repetitivos del tipo LTR, muy frecuentes en los genomas vegetales, incluido el mismo café, donde se ha comprobado su gran abundancia (23, 26). Adicionalmente, tienen la ventaja de poder separarse sobre geles de agarosa, evitando así la preparación de geles de poliacrilamida, necesarios para la visualización de marcadores como los AFLP o los microsatélites. A pesar de estas ventajas, la mayor limitante de los iPBS frente a los microsatélites, es el hecho de ser marcadores dominantes, generando por lo tanto, información parcial sobre la segregación de cada locus.

Distancias genéticas entre poblaciones. Al igual que lo observado para las variables morfológicas, la caracterización molecular no permitió separar en forma clara las seis poblaciones de *C. liberica*. Esto reafirma la existencia de una baja diversidad genética entre las poblaciones representadas en la CCC. Al comparar los valores de heterocigosidad esperada (*He*) y de diversidad poblacional promedio (*I*), entre los Libérica y los Excelsa se observa una variación importante dentro de cada grupo. Sin embargo, esta variabilidad intra-poblacional es menor para el caso de los Abeokutae, el otro grupo con mayor representación en la colección.

Los análisis mostraron que existe una relación más estrecha entre los Excelsa, Libérica y Abeokutae, que la observada entre éstos y los grupos menos representados como Nearnoldiana, Aruwimiensis y Pasyagor. En general, todos los grupos comparten muchas características morfológicas y parte del polimorfismo molecular, lo que al final se traduce en una separación incipiente en términos de distancias genéticas.

Una evaluación molecular realizada en la colección de germoplasma del Instituto

Agronómico de Campinas, IAC (Brasil), usando marcadores RAPD, mostró una muy baja diversidad entre las accesiones de *C. liberica*. Al examinar el origen de las accesiones se encontró que de los nueve individuos estudiados, dos resultaron ser hermanos medios, mientras que los siete restantes eran clones derivados de una sola planta original que llegó a la CCC en los años 40 (43). En ese mismo trabajo, los valores de diversidad estimados por el índice de Shanon fueron menores a los encontrados en el presente estudio. Por ejemplo, para las poblaciones de Libérica y Excelsa, Silvestrini *et al.* (43) encontraron valores de 0,042 y 0,175, respectivamente, mientras que en este trabajo los valores fueron de 0,40 y 0,39, respectivamente (43). La población de Abeokutae por su parte, tuvo un índice ligeramente inferior al observado en dicho reporte (0,25 vs 0,29).

De acuerdo con la información disponible en la CCC, las accesiones de *C. liberica* llegaron al país en diferentes años (1947, 1969, 1974) enviadas por el CATIE, a donde habían llegado provenientes de países como Sri Lanka (antiguo Ceilán), Filipinas e incluso Madagascar. Una vez recibidas en la CCC, las semillas fueron sembradas y conservadas de manera separada mediante propagación vegetativa. Sin embargo, no se descarta que algunas accesiones hayan sido objeto de multiplicación por semilla ante la dificultad de obtener clones. Como lo muestra el análisis de varianza, casi toda la variación genética observada (>99%) se explica por el polimorfismo encontrado entre accesiones, independientemente del grupo o población a la que éstas pertenecen. Tanto la selección artificial ejercida previamente sobre algunas poblaciones originales como los Excelsa, así como el reducido número de accesiones presentes en la colección, son dos factores que sin duda han influido en la

estructura genética que muestran actualmente las poblaciones de *C. liberica* de la CCC.

La presente investigación se propuso contribuir al conocimiento de la diversidad genética de la especie *C. liberica* en la CCC. Los resultados revelaron una elevada variabilidad en cuanto a caracteres como el tamaño y color de los frutos, el tamaño de las hojas y el número de fascículos por nudo, entre otros, los cuales tienen interesantes posibilidades para el mejoramiento futuro de *C. arabica*. El uso combinado de descriptores morfológicos junto con marcadores moleculares tipo iPBS, usados por primera vez en café, permitió evidenciar la presencia en la colección de individuos portadores de características propias de los dos grupos más representativos de la especie: Libéricas y Excelsas (también conocidos como Dewevrei).

Con base en esta información, el paso siguiente será la planeación de experimentos destinados a estudiar el comportamiento de esta especie frente a, por ejemplo: plagas y enfermedades, suelos pobres en nutrientes o incluso adaptación a zonas muy secas.

Desde el punto de vista de la conservación y uso del germoplasma, la baja diversidad inter-poblacional encontrada obliga a pensar en estrategias como: (i) Realizar esfuerzos tendientes a adquirir nuevas accesiones con el fin de aumentar no solo la diversidad genética, sino el tamaño efectivo de las poblaciones de *C. liberica* presentes en la CCC; (ii) Seleccionar dentro de cada población aquellos individuos portadores de la mayor diversidad, a fin de incluirlos en un plan de cruzamientos con líneas cultivadas de *C. arabica*, buscando generar materiales pre-mejorados que sirvan de puentes genéticos para la transferencia de caracteres de interés, usando la vía de los híbridos

triploides; y (iii) Comparar la diversidad de las poblaciones presentes en la CCC, con muestras tipo representativas de los dos grandes grupos Libérica y Dewevrei. Esto con el fin de determinar su pureza genética y eventualmente establecer el grado de flujo génico que ha ocurrido antes o durante su entrada a la colección de germoplasma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Laura F. Gonzales en la optimización de los marcadores iPBS, y a los auxiliares John E. Quintero y Carlos A. Vera de la Disciplina de Mejoramiento Genético, en la recolección de muestras en el campo. A los doctores María del Pilar Moncada, Hernando Cortina y François Anthony por sus comentarios y sugerencias, que contribuyeron a mejorar el texto final de este manuscrito.

LITERATURA CITADA

1. AHMAD, J.; VISHVESHWARA, S. *Coffea liberica* Bull ex Hiern: A review. Indian Coffee. 44 (2-2): 29-36. 1980.
2. ALVARADO, G.; CORTINA, H. Comportamiento agronómico de progenies de híbridos triploides de *Coffea arabica* var. Caturra X (Caturra X *Coffea canephora*). Cenicafé. 48 (2): 73-91. 1997.
3. ANTHONY, F., CLIFFORD, M., NOIROT, M. Biochemical diversity in the genus *Coffea* L.: chlorogenic acids, caffeine and mozambioside contents. Genetic Res Crop Evol, 40: 61-70. 1993.
4. ANTHONY, F., DUSSERT, S., DULLOO, E. The coffee genetic resources. EN: Engelmann F, Dulloo E, Astorga C, Dussert S, Anthony F (Eds) Complementary strategies for *ex situ* conservation of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources: a case study in CATIE, Costa Rica. Topical reviews in agricultural biodiversity. Bioversity International, Rome, Italy, pp 12–22. 2007.
5. ANTHONY, F., BERTRAND, B., ETIENNE, H., LASHERMES, P. *Coffea* and *Psilanthus*. IN: C. Kole (Ed), Wild Crop Relatives: Genomic and

- Breeding Resources, Plantation and Ornamental Crops, Chapter 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011.
6. BERTHAUD, J. Les ressources génétiques pour l'amélioration des caféiers africains diploïdes. Montpellier, France. ORSTOM, Collection travaux et documents. 379 p.1986.
 7. BETTENCOURT, A.J., C.J. RODRIGUES, Jr. Principles and practice of coffee breeding for resistance to rust and other diseases. EN: Clarke RJ, Macrae R (Eds) Coffee. Vol 4. Elsevier, London, UK. pp. 199-234. 1988.
 8. BRIDSON, D.M. The lectotypification of *Coffea liberica* (Rubiaceae). Kew Bulletin. Vol 40 (4): 805-807. 1985.
 9. BRIDSON, D.M. Studies in *Coffea* and *Psilanthus* for part 2 of "Flora of Tropical East Africa": Rubiaceae. Kew. Bulletin, 36: 817-860. 1982.
 10. CARVALHO, A. Principles and practice of coffee plant breeding for productivity and quality factors: *Coffea arabica*. EN: Clarke RJ, Macrae R (Eds) Coffee. Vol 4. Elsevier, London, UK. pp. 129-165. 1988.
 11. CASTILLO, J., PARRA, H.J. Exploración en el contenido de cafeína, grasas y sólidos solubles en 113 introducciones de café. Revista Cenicafé, 24: 3-29. 1973.
 12. CASTILLO, J. Producción y características de grano de germoplasma de café introducido a Colombia. Revista Cenicafé, 26: 3-26. 1975.
 13. CASTRO, B.L., CORTINA, H.A., ROUX, J., WINGFIELD, M.J. New coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes exhibiting high resistance to leaf rust and *Ceratocystis* canker derived from the *Coffea canephora* species. Tropical Plant Pathology. 2013a (en prensa).
 14. CASTRO, B.L., CORTINA, H.A., ROUX, J., WINGFIELD, M.J. Selection of coffee genotypes with resistance to coffee leaf rust and *Ceratocystis* canker from interspecific hybrids (*Coffea arabica* x *Coffea canephora*). Plant Breed Appl Biotechnol, 2013b (en prensa).
 15. CHAPARRO, A.P., CRISTANCHO, M.A., CORTINA, H., GAITÁN, A. Genetic variability of *Coffea arabica* L. accessions from Ethiopia evaluated with RAPDs. Genetic Resources and Crop Evolution 51: 291-297. 2004.
 16. CHEVALIER, A. Les caféiers du globe. Recherches sur la classification et l'anatomie des caféiers et de quelques Rubiacées. Partie I. pp. 170-185. 1947.
 17. DAVIS, A.P., GOVAERTS, R., BRIDSON, D.M., STOFFELEN, P. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). Bot. Jour. Linnean Soc., 152: 465-512. 2006.
 18. DUSSERT, S., LASHERMES, P., ANTHONY, F., MONTAGNON, C., TROUSLOT, P., COMBES, M.C., BERTHAUD, J., NOIROT, M., HAMON, S. Le caféière *Coffea canephora*. IN: Hamon P, Seguin M, Perrier X, Glaszmann JC. (Eds) Diversité génétique des plantes tropicales cultivées. Collection Repères, CIRAD Editions. pp 175-194. 1999.
 19. FAZUOLI, L.C., LORDELLO, R.A. Resistencia de *Coffea liberica* e *C. dewevrei* a *Meloidogyne exigua*. Soc. Brasil. Nemat. Public. No. 2. 197-199. 1977.
 20. GÓNGORA, C., MACEA, E., CASTRO, A.M., IDARRAGA, S., CRISTANCHO, M.A., BENAVIDES, P., GAITAN, A., GALBRAITH, D., VANIER, C. Interaction between coffee plants and the insect coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. EN: 24 International Conference on Coffee Science. November 11-16. p 57. Oral presentation A12. 385 p. 2013.
 21. IPGRI. Descriptores del café (*Coffea* spp. y *Psilanthus* spp.). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. Roma, Italia. 36 p. 1996.
 22. KALENDAR, R., ANTONIUS, K., SMÝKAL, P., SCHULMAN, A.H. iPBS: a universal method for DNA fingerprinting and retrotransposon isolation. Theor Appl Genet, 121:1419-1430. 2010.
 23. KIDWELL, M.G. Transposable elements and the evolution of genome size in eukaryotes. Genetica, 115: 49-63. 2002.
 24. LASHERMES, P., BERTRAND, B., ETIENNE, H. Breeding Coffee (*Coffea arabica*) for Sustainable Production. EN: Jain S.M., Priyadarshan P.M. (Eds), Breeding Plantation Tree Crops: Tropical Species, Chapter 14. Springer Science-Business Media. pp 525 -543. 2009.
 25. LEBRUN, J. Recherches morphologiques et systématiques sur les caféiers du Congo. Publications de L'institut National pour l'Étude Agronomique du Congo Belge. 11: 1-186. 1941.

26. LOPES, F.R., CARAZOLLE, M.F., GUIMARAES, G.A., COLOMBO, C.A., CARARETO, C.M.A. Transposable elements in *Coffea* (*Gentianales*: *Rubiaceae*) transcripts and their role in the origin of protein diversity in flowering plants. *Mol genet genomics*, 279: 385-401. 2008.
27. LÓPEZ, G., CORTINA, H., McCOUCH, S., MONCADA, M. del P. Analysis of genetic structure in a sample of coffee (*Coffea arabica* L.) using fluorescent SSR markers. *Tree Genet Genom*. 5: 435-446. 2009.
28. MONCADA, M. del P., McCOUCH, S. Simple sequence repeat diversity in diploid and tetraploid *Coffea* species. *Genome* 47:501–509. 2004.
29. MONTOYA, J.C., MONCADA, M. del P., MENDOZA, G., LOPEZ, G. Optimización y caracterización de SSRs en una muestra del banco de germoplasma de *Coffea* de CENICAFÉ” Revista fitotecnia Colombiana Vol.6 No. 2. Página 44-51. 2006.
30. MONTAGNON, C., LEROY, T. Réaction à la sécheresse de jeunes caféiers *Coffea canephora* de Côte d’Ivoire appartenant à différents groupes génétiques. *Café, Cacao, Thé*, 37: 179-190. 1993.
31. MORENO, G., CASTILLO, J. Germoplasma existente en la Colección Colombiana de Café e información disponible sobre algunas de sus características. Documento Cenicafé, FNC. Chinchiná, Caldas. 1979.
32. MORENO, G., CORTINA, H., ALVARADO, G., GAITÁN, A. Utilización de los recursos genéticos de café en el programa de mejoramiento genético de *C. arabica* en Colombia. IN: Mejoramiento sostenible del café Arabica por los recursos genéticos, asistido por los marcadores moleculares, con énfasis en la resistencia a los nematodos. Memorias Taller del CATIE. p. 33-38. Eds. CATIE-IRD. Turrialba, Costa Rica. 98 p. 2000.
33. N’DIAYE, A., PONCET, V., LOUARN, J., HAMON, S., NOIROT, M. Genetic differentiation between *Coffea liberica* var. *Liberica* and *C. liberica* var. *Dewevrei* and comparison with *C. canephora*. *Plant Syst Evol* 253:95–104. 2005.
34. NEI, M., LI, W.H. Mathematical model for studying genetic variation in terms of restriction endonucleases. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 76: 5269-73. 1979.
35. NEI, M. Genetic distance between populations. *American Naturalist* 106: 283-292. 1972.
36. OROZCO, F.J. La hibridación interespecífica en café y las posibilidades de los híbridos triploides. Conferencias Conmemorativas 50 años de Cenicafé. pp. 54-64. Federación Nacional de Cafeteros. Chinchiná. 255 p. 1990.
37. OROZCO, F.J. Utilización de los híbridos triploides en el mejoramiento genético del café. P. 485-495 IN: Colloque Scientifique International sur le Café. N° 13: Agosto 21-25, 1989: Paipa, Colombia. ASIC. 1989.
38. PEAKALL, R. SMOUSE, P.E. GenAIEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update. *Bioinformatics*, 28: 2537-2539. 2012.
39. PONCET, V., HAMON, P., MINIER, J., CARASCO, C., HAMON, S., NOIROT, M. SSR cross-amplification and variation within coffee trees (*Coffea* spp.). *Genome* 47:1071–1081. 2004.
40. PORTÈRES, R. Note botanique sur le *Coffea excelsa* A. Chev. (*sensu lato*) et le *Coffea macrochlamys* K. Schum. *Revue de botanique appliquée et d’Agriculture tropicale*. Vol. XVI, No. 173. 1936.
41. PRAKASH, N.S., MARQUES, D.V., VARZEA, V.M.P., SILVA, M.C., COMBES, M.C., LASHERMES, P. Introgression analysis of a leaf rust resistance gene from *Coffea liberica* into *C. arabica*. *Theor. Appl. Genet.*, 109: 1311-1317. 2004.
42. ROMERO, J. V., CORTINA, H. Fecundidad y ciclo de vida de *Hypothenemus hampei* (*Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae*) en introducciones silvestres de café. *Cenicafé*. 55 (3): 221-231. 2004.
43. SILVESTRINI, M., MALUF, M.P., SILVAROLLA, M.B., GUERREIRO-FILHO, O., MEDINA-FILHO, H.P., VANINI, M.M.T., OLIVEIRA, A.S., GASPARI-PEZZOPANE, C., FAZUOLI, L.C. Genetic diversity of a *Coffea* Germplasm collection assessed by RAPD markers. *Genet Res Crop Evol*, 55:901–910. 2008.
44. SNEATH, P.H., SOKAL, R.R. 1973. Numerical taxonomy. W. H. Freeman, San Francisco. USA. 573 p.

EVALUACIÓN FÍSICA DE LAS APLICACIONES CON DIFERENTES EQUIPOS DE ASPERSIÓN PARA EL MANEJO DE LA BROCA¹

Diego Fabián Montoya*, Diógenes Alverto Villalba Guott**

MONTOYA, D. F.; VILLALBA G, D. A. Evaluación física de las aplicaciones con diferentes equipos de aspersión para el manejo de la broca. Revista Cenicafé 64 (2): 48-58. 2013

Con el objetivo de evaluar físicamente las aspersiones, en términos de cubrimiento y tamaño de gota, determinar el rendimiento de aplicación y el desprendimiento de frutos de café por el desplazamiento de los operarios, se evaluaron los equipos: de palanca (P), presión previa retenida (PPR), presión previa retenida con aguilón vertical (PPR+AV), motorizado de espalda (ME) y semiestacionario (SE). Los resultados mostraron que los mayores cubrimientos se registraron con los equipos ME y SE en las dos densidades y condiciones de pendiente. Los equipos de P, PPR y PPR+AV registraron cubrimientos similares y superiores a 300 gotas/cm². Los equipos SE y ME presentaron los menores tamaños de gota (VMD) y los mayores tamaños de gotas se registraron con los equipos P, PPR y PPR+AV. El mayor rendimiento de aplicación se presentó con el SE. Con los equipos manuales de espalda se registró mayor rendimiento (PPR+AV), seguido por el de P y el PPR. Los mayores desprendimientos de frutos se produjeron con los equipos ME, P y PPR+AV, en las densidades de 5.000 y 10.000 plantas/ha y pendiente mayor y menor al 40%. Puede concluirse que todos los equipos presentaron mayores cubrimientos y rendimiento de aplicación en la menor densidad de siembra, en ambas condiciones de pendiente.

Palabras clave: Cubrimiento, Diámetro medio volumétrico, rendimiento de aplicación, desprendimiento de frutos de café.

PHYSICAL EVALUATION OF SPRAYING SYSTEMS FOR THE CONTROL OF THE COFFEE BERRY BORER

In order to evaluate spraying physically in terms of: spray coverage, volume median diameter of droplets, determine the application work rate and removing of coffee fruits by displacement of the operators for coffee berry borer control the sprayers equipments were evaluated: lever-operated knapsack (LOKS), pressure retained sprayer (PRS), pressure retained sprayer with vertical boom (PRS + VB), motorised knapsack with piston pump (MKWPP) and semi-stationary (SS). The results showed that the greater coverage produced equipment (MKWPP) and (SS) in both density and slope conditions. The sprayer equipments (LOKS), (PRS) and (PRS + VB) recorded similar sprays coverage above 300 droplets/square centimeter. The equipment (SS) and (MKWPP) had the lowest droplet sizes (VMD) and higher (LOK), (PRS) and (PRS + VB). The major efficiency of spraying was presented by (SS), followed by the (MKWPP). Between the knapsack sprayers equipments the (PRS + VB) was the more efficient followed by the (LOKS) and finally the (PRS). The largest removing of coffee fruits was caused by sprayer equipments (MKWPP), (LOKS) and (PRS + VB) at densities of 5,000 and 10,000 plants/ha and higher slope and less than 40%. The conclusions of this research were: all the sprayer equipments had greater coverage and application work rate in the lowest density in both slope conditions. The equipment (SS) and (MKWPP) produced smaller droplet sizes but the major droplet size was produced by the (LOKS). The largest removing of coffee fruits was generated by the equipments (LOKS) and (MKWPP) and the lower by (PRS) and (SS).

Keywords: Spray coverage, volume median diameter, application work rate, removing of coffee fruits.

¹ Fragmento del Trabajo de Grado para optar el título de Agrónomo.

* Estudiante del programa de Agronomía de UNISARC.

** Investigador Asociado (Hasta abril de 2010). Disciplina de Entomología. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas Colombia..

La broca es considerada la plaga más importante del cultivo del café en el mundo, por atacar directamente el fruto, causando pérdida de peso, daño del grano y pérdida de la calidad de la bebida (2).

Desde su aparición en Colombia en 1988, La Federación Nacional de Cafeteros y el Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, implementaron un programa de manejo integrado de la broca, que comprende el conocimiento de todos los factores del ecosistema cafetero y de sus múltiples interacciones. Estos componentes son: Control cultural (repases, recolecciones oportunas, evaluación de la calidad de la cosecha, entre otros), control biológico (parasitoides y entomopatógenos) y control químico (1).

En Centro América se utilizan diferentes equipos de aspersión para el control químico de la broca del café, tales como: Motorizados de espalda, aspersoras de palanca, aviones, helicópteros y termonebulizadores (2).

En la zona cafetera colombiana, para el control de la broca se utilizan diferentes equipos de aspersión, dependiendo de: La extensión de la finca, topografía del terreno, disponibilidad del agua, capacidad económica del caficultor y costo de los equipos, entre otros factores (6).

Hasta el momento se han utilizado diferentes equipos de aspersión para la aplicación de insecticidas y de entomopatógenos como el hongo *Beauveria bassiana* para el control de la broca del café. Estos equipos utilizan volúmenes de aplicación que varían entre 200 y 400 L.ha⁻¹ y, en algunos casos, usan boquillas que producen tamaños de gotas muy variables, lo que conlleva a pérdidas por deriva y escurrimiento de tal manera que su eficiencia normalmente se ve reducida (1, 3).

En la actualidad, la tecnología de aplicación y los equipos de aspersión están siendo utilizados deficientemente, lo cual ha generado: Incremento de los volúmenes de aplicación, utilización de altas dosis de los insecticidas, aumento en el número de las aplicaciones y consecuentemente baja eficacia de los mismos. Estas situaciones están ocasionando la contaminación del ecosistema cafetero, de los operarios que realizan las aplicaciones e incremento de los costos de las aplicaciones, y presionando a la broca para que adquiera resistencia.

En relación con la tecnología de aplicación, es importante tener en cuenta que una correcta aspersión debe realizarse en el momento oportuno, con la dosis correcta y con equipos calibrados correctamente, lo cual incluye: Adecuado volumen de aplicación por planta (25 a 50 cm³/planta, dependiendo de la edad), óptimo cubrimiento (50-70 gotas/cm²) y adecuado tamaño de gota (150-250 μ), con el fin de obtener alta eficacia biológica de los productos aplicados (7).

Con base en lo anterior, se desarrolló la presente investigación que tuvo como objetivos: 1. Evaluar físicamente las aplicaciones en términos de cubrimiento y tamaño de gota; 2. Determinar el rendimiento de aplicación; y 3. Cuantificar el desplazamiento de los frutos de café por el desplazamiento de los operarios con los diferentes equipos de aspersión, con el fin de proporcionarle al caficultor, información actualizada sobre tecnología de aplicación y equipos de aspersión para el control de la broca del café.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se realizó en las finca La Merced, vereda La Muleta, municipio de Palestina y en la finca San Nicolás, vereda La Floresta, Chinchiná, en

el departamento de Caldas. Se seleccionaron cuatro lotes de café variedad Colombia, de 4 años de edad, con distancias de siembra de 1,0 x 1,0 m y 2,0 x 1,0 m, a libre exposición solar y topografía con una pendiente mayor y menor al 40%.

Materiales. Se utilizaron cinco equipos de aspersión (Tabla 1), tarjetas de papel Kromacote de 48 cm², azul de metileno técnico y lupa monocular de 15 X.

Evaluación física. Para la evaluación física de las aplicaciones con cada uno de los equipos de aspersión, en cada una de las fincas y condición de pendiente, la unidad de trabajo la conformó la jornada laboral de 8 h, con el fin de que los operarios laboraran todo el día, de 7:00 am a 11:00 am y de 1:00 pm a 5:00 pm, durante una semana. Para realizar las aplicaciones, se seleccionaron los operarios entre el personal que se dedicaba a las labores de aspersión en la finca, y se les dieron instrucciones detalladas de las aplicaciones y un entrenamiento previo sobre los equipos y los sistemas de aplicación.

Diseño experimental. Las unidades de trabajo se asignaron aleatoriamente para los equipos y los operarios, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, donde el factor de bloqueo lo conformaron los operarios. Para la evaluación física de las

aplicaciones, la última unidad de muestreo estuvo conformada por las tarjetas instaladas sobre los glomérulos.

Selección de las ramas y ubicación de las tarjetas. En cada unidad de trabajo se seleccionaron diez árboles aleatoriamente y en cada uno de ellos se tomó una rama al azar de la zona productiva, en la cual se instalaron tres tarjetas de papel Kromacote de 48 cm², previamente marcadas, en la posición interna, media y externa de la rama, enrollada y unida en los extremos, por medio de una cinta de enmascarar.

Adicionalmente, en cada uno de los diez árboles seleccionados aleatoriamente, se evaluó el desprendimiento de los frutos de café, ocasionado por el tránsito de los operarios con los equipos durante la aplicación. Antes de iniciar la labor de aspersión, se retiraron los frutos caídos en los platos de los árboles seleccionados.

Sistemas de aplicación. Antes de las aplicaciones, se calibraron los equipos de aspersión con cada uno de los operarios, para determinar el volumen de mezcla por árbol, el cual fue de 50 mL aproximadamente, y el número de árboles asperjados por minuto.

Para el efecto, con las aspersoras de palanca y presión previa retenida se utilizó el sistema de media cara por pasada en

Tabla 1. Descripción de los equipos de aspersión.

Tipo de equipo	Marca	Boquilla	Flujo (cm ³ .min ⁻¹)
Presión hidráulica	Royal Córdor	RC 350B 101X	350 ¹
Presión previa retenida (PPR)	Triunfo 40-100-10	TX3	200 ¹
PPR+ Aguilón vertical (AV)	Triunfo 40-100-10 + AV	TX3	800 ²
Motorizado de espalda ⁴	Murayama MS 056	D - 35	1.400 ³
Semiestacionario ⁵	Maruyama MS 253	D - 35	1.400 ³

1 = Presión 40 psi; 2 = Descarga de cuatro boquillas a 40 psi; 3 = Descarga de dos discos y 15 kg.cm⁻²; 4 = Motorizada de espalda con bomba de presión; 5 = Con 200 m de manguera.

zigzag y con el aguilón vertical dos medias caras por pasada. Con el equipo motorizado de espalda se usó el sistema de dos surcos por encima de la copa de los árboles y/o dos medias caras por pasada, dependiendo de la topografía y/o altura de los árboles, y con el equipo de aspersión semiestacionario se asperjaron dos medias caras de ida y dos de regreso (Figura 1).

Para que los operarios se entrenaran en las aplicaciones con los diferentes equipos de aspersión, antes de aplicar el azul de metileno, se aplicó el hongo *Beauveria bassiana*

(Balsamo) Vuillemin, en una concentración 5×10^9 esporas/g más 2 mL.L⁻¹ de Carrier, en vez de aplicar agua a los lotes de café.

Después de la aplicación de la segunda y/o tercera bombada, se lavaron los equipos y se procedió a aplicar el colorante azul de metileno técnico al 1%. Transcurridos 15 minutos después de las aplicaciones, se retiraron las tarjetas de las ramas, se colocaron en bolsas plásticas previamente marcadas, se llevaron al laboratorio para su evaluación y en cada una se leyeron diez campos al azar.

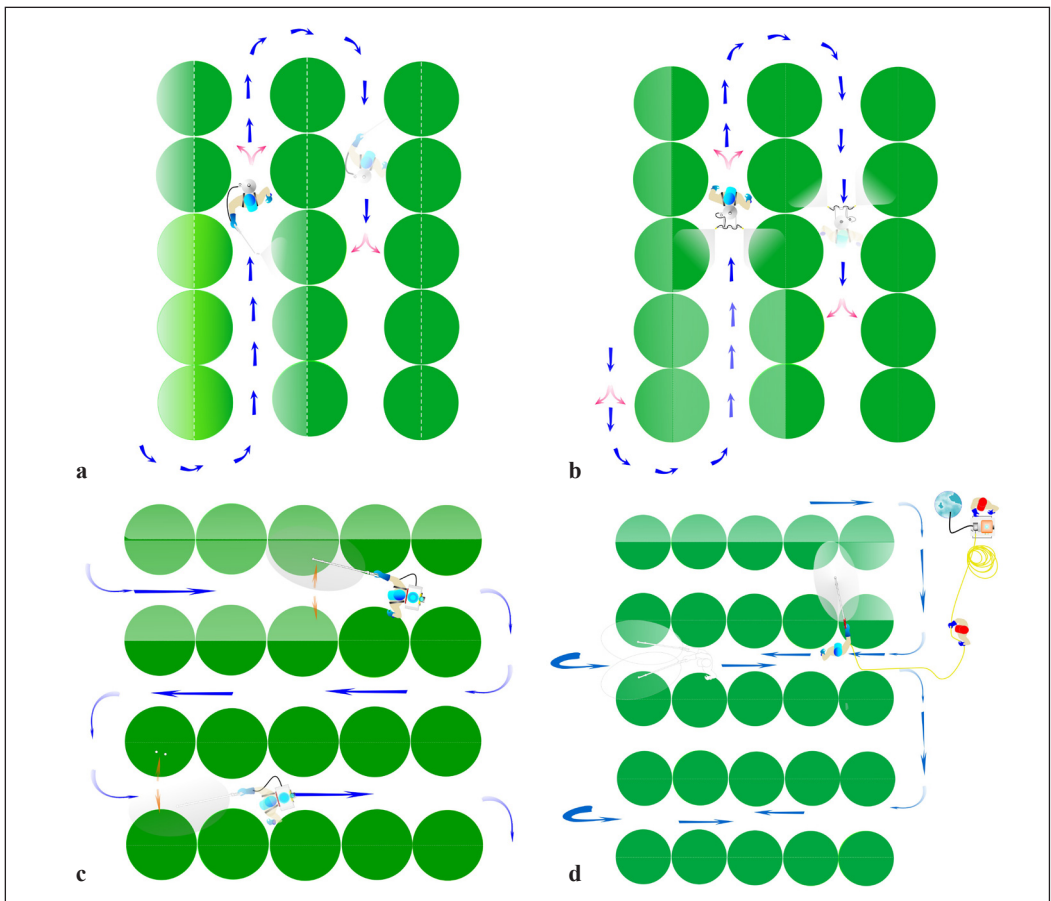


Figura 1. Sistemas de aspersión. **a.** Palanca y PPR. **b.** PPR+Aguilón. **c.** Motorizado de espalda. **d.** Semiestacionario.

Información registrada por unidad de trabajo

Evaluación física

Cubrimiento (*Número de gotas/cm²*). Para evaluar el cubrimiento se determinó el campo óptico de la lupa y/o del observador. Para el efecto, se colocó la lupa sobre un papel milimetrado y se contaron los cuadros (mm) observados en el campo, con este dato se calculó el área total mediante la fórmula $A = \pi \cdot r^2$, con la cual se determinó el campo óptico de la lupa (mm²), resultado que se empleó como el divisor de 100 mm² (1 cm²) para obtener el factor de conversión (F.C.). Para hallar el número de gotas por centímetro cuadrado (gotas/cm²), se multiplicó el factor de conversión por el número de gotas observado en el campo óptico de la lupa.

Diámetro Medio Volumétrico (VMD). Se determinó por el método del diámetro máximo (D.Max), el cual consiste en medir las gotas más grandes dentro de una secuencia lógica de cada colector, con la lupa de 15X, y luego, se clasificaron las gotas en diámetros de 50 μ . Posteriormente, de esta distribución se seleccionó la más grande, la cual debe cumplir los siguientes requisitos: Debe haber por lo menos dos gotas de este tamaño y una del tamaño inmediatamente inferior. Finalmente el VMD se determinó mediante la siguiente relación (Ecuación <1>):

$$VMD = \frac{D.Máx.}{F.E. \times 2,2} \quad \text{Ecuación <1>}$$

Donde:

VMD = Diámetro medio volumétrico
D.máx = Diámetro máximo
F.E. = Factor de expansión
2,2 = Constante

El factor de expansión de una gota cuando se usa el colorante azul de metileno y el papel Kromacote es uno (7).

Rendimiento de aplicación. Cada uno de los operarios, cinco en total, asperjaron durante la jornada laboral con cada uno de los equipos; una vez terminada la labor se contó el número de árboles asperjados.

Desprendimiento de frutos. Para la evaluación de esta variable, se recogieron los frutos del plato del árbol que cayeron al paso de los operarios con los diferentes equipos de aspersión.

Variables de respuestas

- **Evaluación física.** Número de gotas por centímetro cuadrado asociado al indicador del cubrimiento, y micras, asociado al indicador de tamaño de gota (diámetro medio volumétrico- VMD).
- **Rendimiento de aplicación.** Número de árboles asperjados por jornada, asociada al indicador de rendimiento.
- **Desprendimiento de los frutos de café.** Número de frutos desprendidos por árbol.

Análisis estadístico de la información

En cada pendiente se estimaron los promedios y variación para las variables de respuesta, con los equipos evaluados.

Se realizó el análisis de varianza bajo el modelo para el diseño experimental de bloques completos al azar, donde el factor de bloqueo fue el operario. También se hizo la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación física - cubrimiento (Número de gotas/cm²). Cuando se realizaron las aplicaciones en los lotes de 5.000 y 10.000 árboles/ha y pendiente superior e inferior al 40%, los mayores cubrimientos se registraron con los equipos semiestacionarios y motorizados de espalda, sin diferencia estadística significativa entre ellos, pero sí con los equipos manuales (PPR con aguilón vertical, PPR) y de palanca, entre los cuales no hubo diferencias estadísticas (Tabla 2).

En las dos condiciones de pendiente, los mayores cubrimientos se obtuvieron en la densidad de 5.000 árboles/ha, con todos los equipos de aspersión, probablemente por la facilidad de desplazamiento de los operarios entre los surcos de café y por la penetración y distribución del espectro de aspersión, favorecidos por las corrientes de viento en los diferentes tercios de los árboles de café (alto, medio y bajo), tanto en la posiciones interna como externa. No hubo diferencias estadísticas entre los cubrimientos registrados por los equipos de aspersión en las dos densidades y pendientes.

Los mayores cubrimientos se obtuvieron con los equipos semiestacionario y motorizado de espalda, debido probablemente a que

éstos son operados a más altas presiones (15 kg.cm⁻² – 217,5 libras de presión -P.S.I.) que los manuales de espalda (PPR y PPR+AV), los cuales normalmente se trabajan a 40 P.S.I., y los de palanca en los cuales la presión puede variar entre 30 y 80 P.S.I. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Mathews (4) y Villalba (7), quienes encontraron que cuando se utilizan altas presiones se obtienen mayores cubrimientos y menores tamaños de gota. Además, Sierra y Villalba (5), al realizar la evaluación física de los equipos de PPR y PPR con aguilón vertical, registraron cubrimientos entre 132 a 192 gotas/cm² y cuando utilizaron el aguilón vertical y 10.000 plantas/ha el cubrimiento fue de 244 a 334 gotas/cm².

Evaluación física – tamaño de gota (VMD). Cuando se realizaron las aplicaciones en cafetales con 5.000 plantas/ha y pendiente superior al 40%, el mayor promedio de tamaño de gota (VMD) lo registró el equipo de palanca, seguido por el PPR y PPR+AV, sin diferencias estadísticas entre ellos, pero sí con los equipos motorizados de espalda y semiestacionario, los cuales presentaron los menores tamaños de gota (Tabla 3).

Cuando se realizaron las aplicaciones en cafetales con 5.000 árboles/ha y pendiente inferior al 40%, el mayor promedio de

Tabla 2. Promedio del cubrimiento registrado por los diferentes equipos de aspersión.

Equipo de aspersión	Densidad de siembra (plantas/ha)			
	5.000	10.000	5.000	10.000
	Pendiente > al 40%		Pendiente < al 40%	
	Número de gotas/cm ²			
Palanca	588,4 b*	328,0 b	626,0 b	530,35 b
PPR	494,7 b	302,1 b	541,2 b	482,7 b
PPP + AV	605,9 b	391,0 b	629,7 b	587,8 b
Motorizado de espalda	1.238,0 a	934,2 a	1.231,6 a	1.117,0 a
Semiestacionario	1.320,4 a	1.073,8 a	1.089,9 a	998,9 a

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %).

Tabla 3. Promedio del tamaño de gota (VMD) con diferentes equipos de aspersión, en cafetales con 5.000 plantas/ha y pendientes mayores al 40%.

Equipo de aspersión	Diámetro Medio Volumétrico (μ)	
	Promedio	C.V.**
Palanca	272,16 a*	13,71
PPR	268,11 a	17,47
PPP + AV	257,13 a	11,57
Motorizado de espalda	130,49 b	27,82
Semiestacionario	115,09 b	8,74

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %); **C.V. Coeficiente de Variación.

tamaño de gota (VMD) lo registró el equipo de palanca, siendo diferente estadísticamente a los otros equipos manuales y motorizados. Entre las aspersoras de PPR y PPR+AV, no hubo diferencias estadísticas pero sí entre éstos con el motorizado de espalda y el semiestacionario, entre los cuales no hubo diferencias estadísticas (Tabla 4).

Cuando se realizaron las aplicaciones en cafetales con 10.000 plantas/ha y pendientes superiores al 40%, el mayor promedio de tamaño de gota (VMD) se registró con la aspersora de palanca, sin diferencias estadísticas con el equipo PPR, pero sí con los demás equipos de aspersión (Tabla 5). El PPR y PPR+AV no presentó diferencias

Tabla 4. Promedio del tamaño de gota (VMD) con diferentes equipos de aspersión, en cafetales con 5.000 plantas/ha y pendientes < al 40%.

Equipo de aspersión	Diámetro Medio Volumétrico (μ)	
	Promedio	C.V.**
Palanca	276,60 a*	6,19
PPR	197,21 b	1,71
PPP + AV	194,60 b	7,76
Motorizado de espalda	102,92 c	9,75
Semiestacionario	98,21 c	4,09

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %). **C.V. Coeficiente de Variación.

estadísticas significativas, ni este último con el motorizado de espalda, pero sí con el semiestacionario. Entre el motorizado de espalda y el semiestacionario no hubo diferencias estadísticas.

Tabla 5. Promedio del tamaño de gota (VMD) con diferentes equipos de aspersión, en cafetales con 10.000 plantas/ha y pendientes mayores al 40%.

Equipo de aspersión	Diámetro Medio Volumétrico (μ)	
	Promedio	C.V.**
Palanca	310,33 a*	32,93
PPR	263,84 ab	8,64
PPP + AV	217,23 bc	14,25
Motorizado de espalda	138,41 cd	3,93
Semiestacionario	110,05 d	6,27

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %). **C.V. Coeficiente de Variación.

En las aplicaciones en cafetales con 10.000 plantas/ha y pendientes inferiores al 40%, el mayor promedio de tamaño de gota (VMD) se registró con el equipo de palanca, con diferencias estadísticas con los demás equipos de aspersión. Entre el PPR y PPR+AV no hubo diferencias estadísticas significativas, pero sí entre éstos con los equipos motorizado de espalda y semiestacionario (Tabla 6).

Por el sistema de funcionamiento de las aspersoras de palanca, en las cuales la presión es muy variable, puede esperarse variación del tamaño de gota y del cubrimiento. Además, la descarga de la boquilla RC 350B 101X es de $350 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ a 40 PSI, razón por la cual produce gotas más grandes que la boquilla TX3 ($200 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ a 40 PSI) que se utilizó con los equipos de PPR y PPR+AV.

Los equipos motorizado de espalda y semiestacionario siempre produjeron gotas más pequeñas que las aspersoras manuales

porque son operados a mayor presión, además, la aplicación es indirecta y está muy influenciada por la dirección y velocidad del viento.

Tabla 6. Tamaño de gota (VMD) promedio con diferentes equipos de aspersión en cafetales con 10.000 plantas/ha y pendientes < al 40%.

Equipo de aspersión	Diámetro Medio Volumétrico (μ)	
	Promedio	C.V.**
Palanca	329,18 a*	8,29
PPR	143,03 b	0,93
PPR+AV	140,72 b	2,14
Motorizado de espalda	102,70 c	10,41
Semiestacionario	98,46 c	7,85

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5%); **C.V. Coeficiente de Variación.

Rendimiento de aplicación (Número de árboles asperjados por jornal). El mayor rendimiento de aplicación se obtuvo con el equipo semiestacionario (Tabla 7), con diferencias estadísticas con los otros equipos de aspersión, seguido por el motorizado de espalda, el cual fue diferente estadísticamente a los equipos de palanca, PPR y PPR+AV, cuando se realizaron las aplicaciones en los lotes de 5.000 plantas/ha y pendiente mayor y menor al 40%.

Con el equipo semiestacionario en los lotes de 5.000 árboles/ha y pendiente superior al 40%, se registró el mayor número de árboles asperjados, pero este valor disminuyó cuando se realizó la aplicación en lotes con densidad de 10.000 árboles/ha.

El mayor rendimiento de aplicación diario se registró con el equipo semiestacionario, pero éste fue operado por tres trabajadores (tres jornales), seguido por el motorizado de espalda. El equipo de PPR fue el que registró el menor rendimiento de aplicación en ambas condiciones de pendiente, debido

a su funcionamiento manual y a la cantidad de descarga por minuto.

Cuando se realizaron las aspersiones en los lotes de 5.000 y 10.000 árboles/ha y pendiente superior e inferior al 40%, los mayores rendimientos se obtuvieron con los equipos semiestacionario y motorizado de espalda, pero el número de árboles asperjados fue ligeramente mayor con ambos equipos en la menor pendiente, con diferencias estadísticas entre ellos y los demás equipos de aspersión.

Los altos rendimientos de aplicación por jornal obtenidos con los equipos semiestacionario y motorizado de espalda, se deben: a las altas presiones de operación de los equipos, a la utilización de lanzas de doble salida (mayor descarga por minuto), al sistema y a la velocidad de aplicación, asperjando mayor cantidad de árboles por unidad de tiempo, a diferencia de los equipos manuales de espalda (palanca y PPR), en los cuales las boquillas son de menor descarga y por lo tanto menor velocidad de aplicación, asperjando menor número de árboles por unidad de tiempo.

Los resultados obtenidos fueron similares a los registrados por Sierra y Villalba (5), cuando determinaron los rendimientos de aplicación con los equipos de PPR y PPR+AV, al mencionar que este último funcionó adecuada y eficientemente en las diferentes pendientes y densidades de siembra, al compararlo con el equipo de PPR con lanza.

Desprendimiento de frutos de café. En la Tabla 8 puede observarse que cuando se utilizaron los equipos de aspersión en los lotes con densidades de 5.000 plantas/ha y pendiente mayor al 40%, el equipo de palanca presentó el mayor promedio de frutos desprendidos, seguido por el motorizado de espalda y el

Tabla 7. Rendimiento promedio de aplicación con los diferentes equipos de aspersión.

Equipo de aspersión	Densidad de siembra (árboles/ha)			
	5.000	10.000	5.000	10.000
	Pendiente > al 40%		Pendiente < al 40%	
	Árboles asperjados/jornal			
Palanca	2.002 d**	1.634 d	2.027 d	1.943 d
PPR	1.307 e	1.266 e	1.436 e	1.277 e
PPP + AV	3.109 c	2.813 c	3.174 c	2.698 c
Motorizado de espalda	5.042 b	3.715 b	5.282 b	4.926 b
Semiestacionario*	8.369 a	7.769 a	8.200 a	8.279 a

*Equipo operado de tres operarios; **Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %).

PPR+AV, sin diferencias estadísticas entre ellos, pero sí entre la aspersora de palanca y los equipos PPR y semiestacionario, los cuales no fueron estadísticamente diferentes.

En general, para densidades de 5.000 árboles/ha y pendiente superior al 40%, no hubo diferencias estadísticas en cuanto al desprendimiento de frutos entre los equipos de palanca, motorizado de espalda y PPR+AV, ni entre los equipos motorizado de espalda, PPR+AV, PPR y semiestacionario.

En cafetales con densidades de 5.000 **Tabla 8.** Promedio de desprendimiento de frutos en cafetales con densidades de 5.000 plantas/ha y pendientes > al 40%.

Equipo de aspersión	Promedio de frutos desprendidos por árbol	C.V.**
Palanca	0,92 a*	61,19
Motorizado de espalda	0,53 ab	99,50
PPR+AV	0,40 ab	136,93
PPR	0,06 b	223,60
Semiestacionario	0,02 b	223,60

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %); **C.V. Coeficiente de Variación.

plantas/ha y pendiente menor al 40% no hubo diferencias estadísticas entre los diferentes equipos de aspersión, pero el mayor promedio de frutos desprendido

se registró con el equipo motorizado de espalda (Tabla 9).

Tabla 9. Desprendimiento de frutos promedio en cafetales con densidades de 5.000 plantas por hectárea y pendientes < al 40%.

Equipo de aspersión	Promedio de frutos desprendidos por árbol	C.V.**
Motorizado de espalda	0,62 a*	114,18
Palanca	0,32 a	74,60
PPR+AV	0,32 a	143,88
Semiestacionario	0,06 a	223,60
PPR	0,00 a	-----

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %); **C.V. Coeficiente de Variación.

Cuando se utilizaron los diferentes equipos de aspersión en cafetales con densidades de 10.000 plantas/ha y pendientes superiores al 40% el mayor promedio de frutos desprendidos se registró con los equipos motorizado de espalda y de palanca, sin diferencias estadísticas entre ellos, pero sí con los equipos PPR, PPR + aguilón vertical y semiestacionario, con los cuales se desprendieron menores cantidades de frutos (Tabla 10).

Cuando se utilizaron los diferentes equipos de aspersión en cafetales con

densidades de 10.000 plantas/ha y pendiente inferiores al 40%, el mayor promedio de frutos desprendidos lo presentó el equipo PPR+AV, seguido por el equipo de palanca y el motorizado de espalda, entre los cuales no hubo diferencias estadísticas significativas, pero sí entre éstos y los equipos PPR y semiestacionario. El motorizado de espalda no fue diferente estadísticamente al PPR y al semiestacionario (Tabla 11). La mayor cantidad de frutos desprendidos se debe posiblemente a la distancia entre surcos y, por lo tanto, a la dificultad de desplazamiento de los operarios con los diferentes equipos de aspersión y a la pendiente del terreno.

Tabla 10. Desprendimiento de frutos promedio en cafetales con densidades de 10.000 plantas/ha y pendientes > al 40%.

Equipo de aspersión	Promedio de frutos desprendidos por árbol	C.V.**
Motorizado de espalda	16,64 a*	19,22
Palanca	13,30 a	15,14
Semiestacionario	6,26 b	66,33
PPR+AV	5,22 b	34,36
PPR	2,60 b	37,19

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %); **C. V. Coeficiente de Variación.

Tabla 11. Desprendimiento de frutos en cafetales con densidades de 10.000 plantas/ha y pendientes < al 40%.

Equipo de aspersión	Promedio de frutos desprendidos por árbol	C.V.**
PPR+AV	6,86 a*	22,28
Palanca	6,10 a	26,91
Motorizado de espalda	4,18 a	47,96
PPR	2,10 b	39,41
Semiestacionario	2,04 b	54,76

*Promedios seguidos por letras distintas presentan diferencias estadísticas (Tukey al 5 %); **C. V. Coeficiente de Variación.

Puede concluirse que:

- Los equipos de palanca, PPR y PPR+aguilón vertical, registraron cubrimientos similares entre ellos, superiores a 300 gotas/cm² en las dos pendientes y densidades de siembra.
- Con los equipos motorizado de espalda y semiestacionario se obtuvieron los mayores cubrimientos, en las cuatro condiciones experimentales.
- El equipo PPR+AV funcionó adecuada y eficientemente en las dos pendientes y densidades de siembra al compararlo con el equipo PPR.
- Los equipos de aspersión: de palanca, PPR, PPR+AV, motorizado de espalda y semiestacionario, registraron cubrimientos superiores a 50 gotas/cm².
- Los mayores cubrimientos con los diferentes equipos de aspersión se presentaron en la posición externa, seguida por la media y, por último, en la posición interna.
- Los equipos motorizado de espalda y semiestacionario presentaron los menores tamaños de gota y, por lo tanto, los mayores cubrimientos en las cuatro condiciones experimentales.
- La aspersora de palanca, siempre presentó el mayor tamaño de gota en las dos pendientes y densidades de siembra, en relación con los otros equipos de aspersión.
- Con el equipo motorizado de espalda se obtuvo el mayor rendimiento de aplicación por jornal, en los lotes con pendientes mayores y menores al 40% y densidades de 5.000 y 10.000 plantas/ha.

- El mayor número de árboles asperjados por jornada de trabajo se registró con el equipo semiestacionario, pero éste fue manejado por tres operarios, lo cual implica un mayor número de unidades de servicio por jornal.
- Con el equipo motorizado de espalda se obtuvo el mayor rendimiento de aplicación por jornal, en los lotes con pendientes mayores y menores al 40% y densidades de 5.000 y 10.000 plantas/ha.
- La mayor cantidad de frutos desprendidos se presentó en los lotes con alta densidad de siembra, 10.000 plantas/ha.
- En los lotes con pendientes mayores al 40% se ocasionaron los mayores desprendimientos de frutos.
- Los equipos de aspersión motorizado de espalda, palanca y PPR con aguilón vertical fueron los que ocasionaron los mayores desprendimientos de frutos de café en las condiciones del trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las siguientes personas y entidades que brindaron su apoyo y colaboración en las diferentes etapas del estudio: A La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Cenicafé, al doctor Gabriel Cadena Gómez, a la doctora Esther C. Montoya Restrepo, y a los caficultores en

cuyas fincas se desarrolló la investigación, los señores Mauricio Gutiérrez Delgado y Diego Uribe Jaramillo, propietario y administrador, respectivamente, de la finca La Merced, y los señores Alfredo Restrepo Jaramillo y Nicolás Trujillo Gómez, propietario y administrador, respectivamente, de la finca San Nicolás.

LITERATURA CITADA

1. BUSTILLO P., A.; CÁRDENAS M., R.; VILLALBA G., D.; BENAVIDES M., P.; OROZCO H., J.; POSADA F., F. Manejo integrado de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 1998. 134 p.
2. DECAZY, B. Métodos de control químico y cultural de la broca del fruto de café. p. 147-158. En: Memorias del curso sobre manejo integrado de plagas del café con énfasis en broca del fruto *Hypothenemus hampei* (Ferrari). Guatemala : IICA : PROMECAFE, 1987.
3. FLORÉZ M., E.; BUSTILLO P., A.E.; MONTOYA R., E.C. Evaluación de equipos de aspersión para el control de *Hypothenemus hampei* con el hongo *Beauveria bassiana*. Cenicafé 48(2):92-98. 1997.
4. MATTHEWS, G.A. Pesticide application methods. London : Longman, 1979. 335 p.
5. SIERRAS, C.A.; VILLALBA G., D.A. Evaluación de las aplicaciones con aspersoras convencionales de espalda, equipada con aguilón vertical en cafetales densos: Taller sobre la roya del café (*Hemileia vastatrix*). Chinchiná : Cenicafé, 1982. 10 p.
6. VILLALBA G., D. Calibración de aspersoras manuales de espalda. Chinchiná : Cenicafé, 1995. 16p. (Boletín de extensión No. 75).
7. VILLALBA G., D. Tecnología de aplicación y equipos de aspersión para el control de la broca del café. Chinchiná : Cenicafé, 2003. 45 p.

INFLUENCIA DEL SISTEMA RADICAL DE CUATRO ESPECIES VEGETALES EN LA ESTABILIDAD DE LADERAS A MOVIMIENTOS MASALES¹

Jorge Enrique Barrera Gutiérrez*; José Horacio Rivera Posada**; Miguel Eugenio Cadena Romero***

BARRERA G., J.E.; RIVERA P., J.H.; CADENA R., M.E. Influencia del sistema radical de cuatro especies vegetales en la estabilidad de laderas a movimientos masales. Revista Cenicafé 64 (2):59-77. 2013

Se evaluó el efecto de las raíces de *Trichanthera gigantea*, *Coffea arabica*, *Inga codonantha* y *Cordia alliodora* sobre la resistencia al cortante tangencial del suelo (*R.C.*) a 20, 80 y 120 cm de profundidad, en un suelo *Acrudoxic Melanudands* ubicado en la Estación Central Naranjal (Chinchiná, Caldas). Por cada especie se seleccionaron tres árboles adultos, se hicieron pruebas de corte directo empleando una caja metálica de 20x20x10 cm, sobre la cual se aplicaron esfuerzos tangenciales, a una velocidad que varió entre 0,25 y 0,44 mm.min⁻¹. La *R.C.* se determinó por medio de diagramas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria. Sobre las raíces presentes en el plano de falla se determinó el diámetro e índice de ocupación (*I.O.*). Se estableció la profundidad de la raíz principal y la extensión de raíces laterales. Los mayores promedios de *R.C.* se presentaron en el suelo con raíces de las especies arbóreas, así: 55,6 kPa en suelo con raíces de *C. alliodora* a 20 cm de profundidad, 70,5 kPa con raíces de *T. gigantea* a 80 cm y 76,0 kPa con raíces de *C. alliodora* e *I. codonantha* a 120 cm. Los menores valores de *R.C.* se registraron en el suelo sin raíces y con raíces de café (43,7 y 44,1 kPa, respectivamente, a 20 y 120 cm). Se obtuvieron coeficientes de correlación (*r*) positivos entre el incremento de la *R.C.* e *I.O.* (0,69 a 0,96). Los sistemas radicales de *C. alliodora* e *I. codonantha* alcanzaron una profundidad de 2,2 m y las raíces laterales hasta 10,7 y 5,5 m, respectivamente. Las raíces de *T. gigantea* y *C. arabica* alcanzaron hasta 1,6 y 0,60 m de profundidad y 5,0 y 1,2 m de longitud lateral, respectivamente.

Palabras clave: Suelo, café, raíces, resistencia al cortante tangencial, bioingeniería.

ROOT SYSTEM INFLUENCE OF FOUR BOTANICAL SPECIES IN THE HILLSIDE STABILITY AGAINST MASSAL MOVEMENTS

The effect of the roots of *Trichanthera gigantea*, *Coffea arabica*, *Inga codonantha* and *Cordia alliodora* on tangential shear resistance of the soil (*R.C.*) was evaluated at 20, 80 and 120 cm deep in soil *Acrudoxic Melanudands* located at the Experimental Station Naranjal (Chinchiná, Caldas). Three adult trees were selected for each species, direct shear tests were made using a metal box 20x20x10 cm, on which tangential forces were applied at a speed rate between 0.25 and 0.44 mm.min⁻¹. *R.C.* was determined by means of a soil tangential strength vs. a soil unitary deformation diagram. Diameter and occupancy index (*OI*) were determined on the roots present in the fault plane. The taproot depth and the lateral root length were established. The highest mean values of *R.C.* were found in the soil with roots of tree species as follows: 55.6 kPa in soil with *C. alliodora* roots at 20 cm of depth, 70.5 kPa with *T. gigantea* roots at 80 cm of depth, and 76.0 kPa with *C. alliodora* and *I. codonantha* roots at 120 cm of depth. The lowest values of *R.C.* were recorded in the soil without roots and roots of coffee (43.7 and 44.1 kPa, respectively, at 20 and 120 cm). Positive correlation coefficients (*r*) were obtained between the increase in *R.C.* and *O.I.* (0.69 to 0.96). Root systems of *C. alliodora* and *I. codonantha* reached a depth of 2.2 m and lateral roots up to 10.7 and 5.5 m, respectively. The roots of *T. gigantea* and *C. arabica* reached 1.6 and 0.60 m of depth and 5.0 and 1.2m of lateral length, respectively.

Keywords: Mass movement, soil, coffee, roots, soil shear strength, bioengineering.

¹Fragmento de tesis de grado del primer autor para optar al título de Ingeniero Forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá.

* Ingeniero Forestal.

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

*** Profesor Titular Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

La bioingeniería del suelo es una ciencia aplicada que combina el uso de los principales diseños de ingeniería convencional con conceptos biológicos y ecológicos para construir y asegurar la supervivencia de las comunidades vegetales para controlar naturalmente la erosión y las inundaciones (3).

Lammeranner *et al.* (10), describen la bioingeniería como el enfoque adecuado para hacer frente a los problemas de erosión y deslizamientos de tierra poco profundos, arraigados especialmente en los países en desarrollo como Nepal. Esta técnica es una solución rentable por el uso de materiales disponibles a nivel local y mano de obra de bajo costo. Por otra parte, este enfoque permite la participación de la población local en los aspectos de gestión y mantenimiento.

La vegetación es un componente muy importante en la estabilidad del suelo en zonas de ladera, debido al refuerzo mecánico de sus raíces y la disminución de la presión de poros del suelo, causado por la evapotranspiración (14, 28). El efecto que las raíces tienen sobre la resistencia mecánica del suelo, se debe a que le permiten soportar la acción de cargas cortantes de gran magnitud que lo harían fallar en el caso de no contar con el refuerzo de ellas. En varios trabajos de investigación se ha encontrado que en los diagramas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria, los valores para las resistencias pico y residual son más altos y se alcanzan en rangos de deformación más amplios, que los logrados por el suelo libre de raíces (4, 25, 26, 27).

El efecto descrito anteriormente se debe a que cada raíz individual puede considerarse como una fibra elástica, que puede resistir grandes esfuerzos de tensión y que al estar adheridas al suelo le transmiten sus propiedades mecánicas,

conformando así un material compuesto y de resistencia alta al cortante (6). Este fenómeno es más representativo en especies con sistemas radicales profundos, como es el caso de los árboles, ya que sus raíces penetran varios metros, y por la acción de su propio peso aumentan la fricción entre los granos, generando una unión perfecta entre la matriz del suelo y cada raíz, haciendo que la resistencia a la tensión de cada una de ellas se transmita completamente y el efecto de refuerzo sea total (25, 26, 27). En algunos estudios de campo en suelos con diferentes usos, se ha encontrado que las raíces con diámetros entre 1 mm a 20 mm son las que tienen mayor resistencia mecánica a esfuerzos de tensión y, por lo tanto, las que más contribuyen en el aumento de la resistencia al cortante tangencial del suelo (23). Por lo tanto, los árboles mejoran la resistencia al cortante tangencial del suelo, ya que le transmiten las propiedades mecánicas de sus raíces por fricción, adhesión y cohesión.

La vegetación ribereña tiene un papel importante en la protección de las orillas de los ríos a través del sistema de raíces y la cubierta vegetal, la que mejora la agregación de las partículas del suelo en una situación de baja cohesión, la reducción de la escorrentía, erosión y sedimentación de los cauces de los ríos (7).

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la distribución del sistema radical de cuatro especies vegetales comunes en la Zona Cafetera Colombiana y su efecto sobre la resistencia del suelo al cortante tangencial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del sitio de estudio. El trabajo se realizó en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, ubicada en

el municipio de Chinchiná, 04° 58' de latitud Norte y 75° 42' de longitud Oeste a 1.400 m de altitud, precipitación promedio anual de 2.646 mm. El sitio hace parte de una terraza disectada, recubierta por un manto continuo de cenizas volcánicas, con suelos clasificados como Unidad Chinchiná (*Acrudoxic Melanudands*), cuyo material parental son las cenizas volcánicas. Son suelos muy profundos, ricos en materia orgánica, bien drenados, y aireados, de negro a pardo muy oscuro en la superficie y pardo amarillentos en profundidad. Con texturas medianas, ácidos, alta retención de fosfatos, contenidos bajos de Ca, Mg, K y CIC alta (24).

Distribución de raíces. Se destapó el sistema radical de los árboles evaluados por cada especie, hasta encontrar la profundidad máxima a la que llegaba la raíz principal y la longitud de las raíces laterales. Se pesaron tres árboles de nogal cafetero.

Método de evaluación. Se seleccionaron tres árboles adultos de las especies: quiebrabarrigo (*Trichanthera gigantea*), café (*Coffea arabica*) variedad Caturra, guamo (*Inga codonantha*) y nogal cafetero (*Cordia alliodora*). Por cada especie, se realizaron seis pruebas de corte directo en cada una de las siguientes profundidades: 20 cm, 80 cm y 120 cm, para lo cual se empleó un equipo de muestreo metálico para muestras de suelo no disturbadas y una caja de corte metálica de dimensiones 20 x 20 x 10 cm, propuestos por Coker y Flores (2), para proteger la muestra en el sitio sin disturbar, mientras se aplicaba la fuerza tangencial que permitió romper el bloque de suelo. Con el fin de realizar comparaciones de resistencia al cortante tangencial, sin la influencia de raíces, se escogió como testigo un sitio libre de vegetación de tipo herbáceo, arbóreo o arbustivo, y se hizo la misma evaluación.

El equipo para el muestreo de suelos en el sitio y sin disturbar, se construyó con lámina de hierro de 1/8" de 30 x 30 cm de área, en cuyo interior tenía demarcado un cuadrado de 20 cm de lado, cuyo perímetro estuvo delineado por 40 hoyos de 1 cm de diámetro, acondicionados de tal forma que permitieran la introducción de 40 clavos de hierro de aproximadamente 1 cm de diámetro y 13 cm de longitud, con el fin de aislar la muestra en el sitio, sin disturbar. Cada uno de estos clavos tenían en su cabeza un tope metálico para facilitar su extracción manual, y conservar así la muestra intacta (Figura 1A). Este dispositivo se ubicó sobre la superficie del terreno nivelado (Figuras 1A y B) y manualmente se retiró el suelo sobrante de los lados y hacia abajo, luego de quitar los clavos, hasta aislar un bloque de suelo en el sitio, de 20 x 20 x 10 cm, que se cubrió por sus cuatro caras laterales con una caja metálica que tenía las mismas dimensiones del bloque, para la protección lateral de la muestra, mientras se ejercía la fuerza tangencial, para romperla (Figuras 1C y D).

En uno de los lados de la caja, se instaló una celda de carga que se conectó a un dinamómetro, con el que se obtuvieron las fuerzas de corte aplicadas con un gato mecánico. También se instaló un LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), el cual se conectó a un multímetro para medir el desplazamiento de la caja con la muestra de suelo (Figuras 2A y C). Por último, en la parte superior de las muestras de suelo se colocaron cargas con los siguientes valores de esfuerzo normal (Figura 2B): 5,99 kPa, 8,17 kPa, 10,9 kPa, 13,62 kPa, 16,34 kPa y 19,07 kPa.

Para cada profundidad dentro del perfil del suelo se hicieron seis pruebas de corte, utilizando un valor de esfuerzo normal

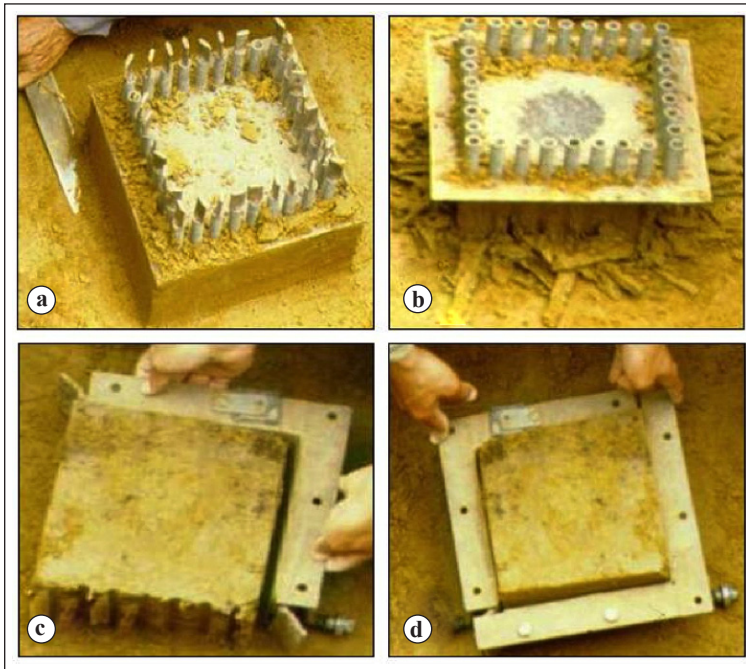


Figura 1. Preparación de la muestra de suelo para la prueba de corte directo. **a y b.** Procedimiento para obtener la muestra con el equipo metálico de muestreo; **c y d.** Protección lateral de la muestra con la caja de corte.

diferente para cada una de ellas, el cual se mantuvo constante durante el tiempo de la evaluación. Las fuerzas tangenciales que desplazaron el suelo se aplicaron con un gato mecánico, a una velocidad que osciló entre $0,25 \text{ mm.min}^{-1}$ y $0,44 \text{ mm.min}^{-1}$. Cada prueba finalizó cuando la caja alcanzaba un desplazamiento máximo de 4 cm (20% de deformación unitaria ($D.U.$)). Se tomó el valor final de $D.U.$ como criterio de falla de la muestra, en el caso dado que la curva de esfuerzos no presentara un pico definido, de tal forma que el valor de resistencia al cortante que alcanzara la muestra en el 20% de deformación unitaria, se tomaría como la resistencia pico o resistencia al cortante tangencial, de acuerdo con Márquez (11).

Índice de ocupación de raíces. Al finalizar cada prueba de corte, la muestra de suelo fue disecada cuidadosamente al aire y se recolectaron las raíces que atravesaban el plano de falla, con el fin de medir el área de

su sección transversal, para lo cual de cada raíz se midió su diámetro en los extremos superior e inferior, se calculó el promedio de estos dos valores y se determinó el diámetro promedio. Con dicho valor se calculó el área de la circunferencia para cada raíz. Este mismo procedimiento se hizo para todas las demás raíces y se calculó el índice de ocupación de ellas en el suelo, utilizando la relación propuesta por Waldron y Dakessian (26) y Gray y Sotir (6):

$$I.O = \frac{\sum A_r}{A_s} \quad \text{Ecuación <1>}$$

Donde:

$I.O$ es el índice de ocupación de raíces, adimensional; A_r es el área de circunferencia formada por la sección transversal de cada raíz presente en el plano de falla, en cm^2 ; A_s es el área del plano de falla, equivalente a 400 cm^2 .

Determinación de la resistencia al cortante tangencial del suelo. Con los datos de esfuerzos tangenciales y deformaciones unitarias se construyeron diagramas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria, en un sistema de coordenadas cartesianas, para cada prueba de corte hecha. El punto en el cual se equilibran las fuerzas que resisten y las que tratan de hacer fallar la muestra, corresponde a la resistencia al cortante tangencial del suelo, y se obtiene en el pico más alto alcanzado en el diagrama. Otro valor hallado fue el de la resistencia residual, la cual se determinó como el valor más bajo al que llegó el diagrama después de fallar el suelo por efecto del esfuerzo cortante tangencial.

Con el fin de comprobar el efecto de las raíces sobre la resistencia al cortante tangencial del suelo, se realizaron análisis de correlación lineal simple (r) entre el incremento dado por las raíces de cada especie a la resistencia al cortante y el área ocupada por ellas en el plano de falla o índice de ocupación de raíces ($I.O.$). Se tomaron 18 datos de resistencia al cortante registrados para cada una de las especies en todo el perfil, y se sometieron a análisis estadístico, utilizando la prueba de Bounferroni al 5% (12).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización dasométrica de las especies vegetales estudiadas

En la Tabla 1, se presentan las principales características dasométricas de las especies vegetales estudiadas, con alturas que oscilan entre 1,9 m (*Coffea arabica*) y 16,3 m (*Cordia alliodora*). El fuste con diámetro a la altura del pecho entre 0,08 m (*Coffea arabica*) y 0,45 m (*Cordia alliodora*). El diámetro de copa entre 1,1 m (*Coffea arabica*) y 12,4 m

(*Cordia alliodora*). Todas las especies estudiadas fueron mayores de 7 años de edad.

La vegetación arbórea y arbustiva permite que en el perfil del suelo se presenten sistemas radicales de anclaje mayor, en lo profundo y hacia los lados, aumentando su resistencia a la ruptura y con ello la estabilidad del terreno a los movimientos masales. Esto ha sido corroborado por trabajos de Flórez (5), reportados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en el área comprendida entre Manizales y Chinchiná, mediante seguimiento aerofotográfico y comprobaciones de campo, de zonas con sistemas agroforestales que pasaron a monocultivos, en suelos inestables, pedregosos, de pendientes fuertes y longitudes largas. Se comprobó que después de 2 a 6 años de transformado el sistema agroforestal, con eliminación de las especies forestales, en épocas lluviosas se presentaron ocho derrumbes por kilómetro cuadrado, debido a la pérdida de estabilidad de los suelos, como consecuencia de la suspensión del anclaje y amarre ejercido por los sistemas radicales de los árboles forestales, ya que al cortarlos se inicia un proceso de pudrición de las raíces.

En estudios de campo en laderas forestadas, O' Loughlin (1984) citado por Morgan y Rickson (13), indica que son las raíces más finas (1 – 20 mm de diámetro) las que contribuyen al refuerzo mecánico del suelo, y que las raíces más grandes juegan un papel no significativo. Las gramíneas, leguminosas y arbustos pueden tener un efecto de refuerzo a profundidades de 0,75 – 1,5 m. Los árboles tienen efectos a profundidades mayores y pueden mejorar la resistencia del suelo a profundidades de 3 m o más dependiendo de la morfología de las raíces. Los sistemas de raíces conducen a aumentar la resistencia en el suelo a través de un incremento en la

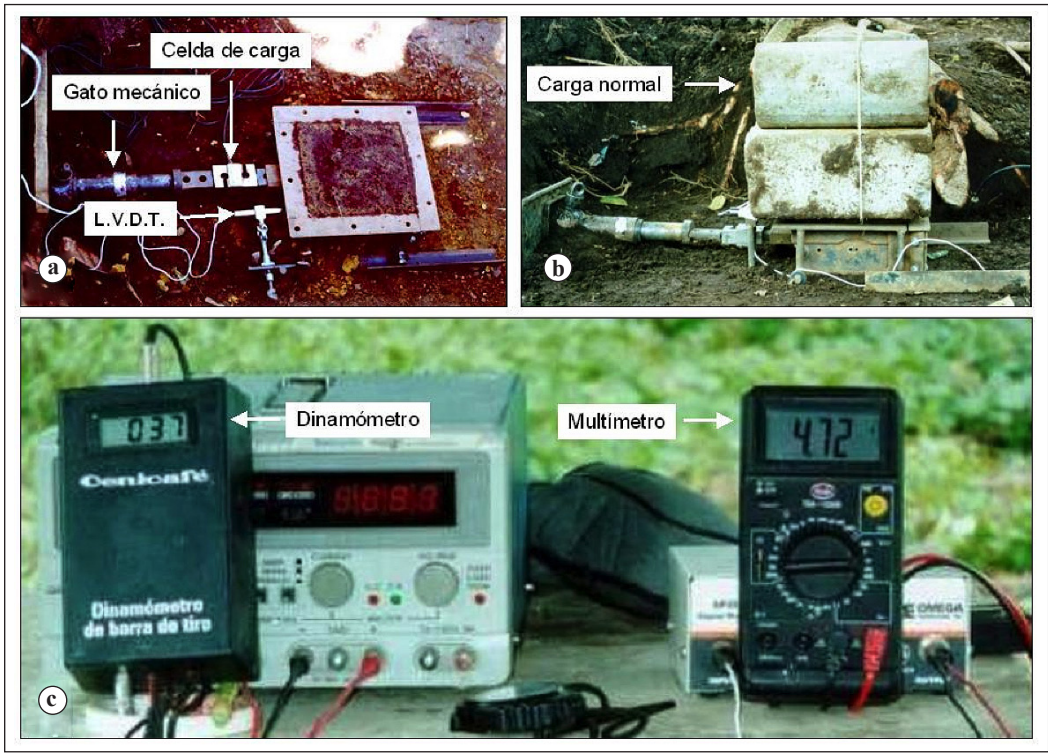


Figura 2. a. Montaje del equipo de corte; b. Aplicación de la carga normal para la consolidación de la muestra; c. Equipos electrónicos para la adquisición de datos.

Tabla 1. Promedio de las principales características dasométricas para las cuatro especies vegetales evaluadas.

Especie vegetal	Altura (m)	D.A.P. (cm)	Proyección copa (m)	Edad (años)
<i>Cordia alliodora</i>	16,3	44,9	12,4	> 20
<i>Trichanthera gigantea</i>	6,5	15,8	5,6	> 10
<i>Inga codonantha</i>	11,3	44,3	9,3	> 20
<i>Coffea arabica</i>	1,9	8,0	1,1	7

D.A.P.: Diámetro del fuste o tronco del árbol a la altura del pecho.

cohesión por el enlace de fibras de raíces con el suelo y la adhesión de las partículas del mismo a las raíces de las plantas.

Distribución del sistema radical de las especies estudiadas

En la Tabla 2 se presenta la distribución en longitud lateral y profundidad del sistema

radical de las especies estudiadas. Se observa que *Cordia alliodora* presenta las raíces laterales de mayor longitud promedio (11,7 m) y profundidad promedio de 2,8 m, seguida por *Inga codonantha* con longitud promedio de raíces laterales y profundidad de 5,5 m y 2,2 m, respectivamente. El café muestra los valores más bajos de raíces laterales (1,2 m) y de profundidad (0,60 m) (Tabla 2).

Tabla 2. Características del sistema radical de cuatro especies vegetales de la zona cafetera.

Especie	Promedio de la longitud de raíces laterales (m)	Promedio de la profundidad del sistema radical (m)	Promedio del peso por árbol (kg)
<i>Cordia alliodora</i>	11,7	2,8	250
<i>Inga codonantha</i>	5,5	2,2	
<i>Trichanthera gigantea</i>	5,0	1,6	
<i>Coffea arabica</i>	1,2	0,60	

En las Figuras 3, 4, 5 y 6, se presenta la distribución de los sistemas radicales de las especies vegetales estudiadas.

En el *Cordia alliodora* (Figuras 3 A y B), se encontró, un sistema radical compuesto por una raíz central bien definida (Figura 3 B) y una serie de raíces laterales primarias que se extienden hasta más allá de la proyección de la copa. Por lo tanto, no se puede afirmar que el diámetro de las raíces laterales, son iguales a la proyección de la copa del árbol.

La raíz central pivotante inicia con un diámetro aproximado de 0,15 – 0,16 m desde el cuello, conservando una forma cónica hasta llegar aproximadamente a 0,4 m de profundidad, donde se divide en cuatro o seis raíces con diámetros promedio entre 0,04 y 0,08 m, las cuales llegan hasta aproximadamente 2,20 m de profundidad en promedio.

A partir del eje del árbol se desprenden entre cinco o seis raíces laterales superficiales (Figura 3 A), cuyos promedios de diámetro en el cuello oscilan entre 0,1 m a 0,2 m, y se extienden lateralmente hasta longitudes de 8 m a 15 m, aproximadamente. De estas raíces laterales se desprende gran número de raíces secundarias, con diámetros entre 0,02 m y 0,06 m en el punto de inserción de éstas con la raíz lateral primaria, la cual se desplaza hacia el interior del suelo formando ángulos mayores de 60° respecto a la superficie del terreno y alcanza en la

mayoría de los casos profundidades mayores de 2 m en promedio. La mayor parte de estas raíces están confinadas en un radio aproximado de 1,20 m, medidos a partir del eje del árbol.

Con base en la longitud de las raíces laterales del nogal cafetero (11,7 m de radio, promedio) y el promedio del peso del árbol en conjunto (250 kg), se calculó la presión que ejerce el árbol sobre el terreno equivalente a $(250 \text{ kg}/\pi r^2 = 250\text{kg}/430,05 \text{ m}^2 = 0,58 \text{ kg.m}^{-2})$. Este valor de presión (0,58 kg.m⁻²) sobre el terreno, permite dilucidar las dudas acerca de que los árboles son demasiado pesados y por ello los causantes de los movimientos masales, lo que ha conducido a justificar la deforestación de las laderas colombianas, incrementándose los procesos de erosión y movimientos masales.

Inga codonantha. El sistema radical para guamo tuvo un comportamiento similar al de nogal cafetero en cuanto a su forma y distribución radical, debido a que se observa una raíz principal bien definida (Figura 4) y una serie de raíces laterales que se extienden por la superficie del suelo en forma radial a partir del eje principal.

La raíz principal de forma cónica llega a 0,6 ó 0,7 m de profundidad, donde se divide en tres raíces de 0,05 m a 0,055 m de diámetro en promedio, las cuales alcanzan profundidades mayores de 2,20 m. A partir de la base del tallo del árbol se desprenden

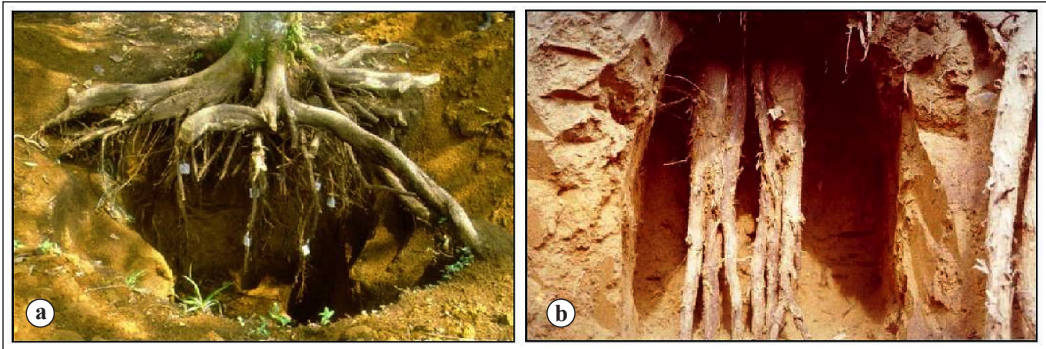


Figura 3. Distribución de raíces para nogal cafetero. **a.** Distribución de laterales y penetradoras; **b.** Raíz pivotante.

entre seis a siete raíces laterales de forma cilíndrica, con longitudes entre 3 m y 10 m. De estas raíces laterales se desprende una gran cantidad de raíces secundarias (penetradoras), con diámetros entre 0,23 m y 0,125 m y que se internan en el suelo con un ángulo casi recto hasta llegar a una profundidad promedio de 2 m. La mayor parte de estas raíces se distribuyen en un radio de 1,20 m medido a partir del eje del árbol.

Por la forma y desarrollo del sistema radical en las dos especies anteriores, las convierte en ideales para la prevención de movimientos masales, tanto superficiales de tipo translacional como rotacionales medianamente profundos, ya que la raíz pivotante y el conjunto de raíces secundarias de tipo penetrador, les permite comportarse como una columna que contrarresta las fuerzas cortantes que tratan de hacer deslizar la masa de suelo en zonas de ladera. Además, por tratarse de especies que en estado adulto alcanzan gran tamaño, el peso de la biomasa, distribuida en el área del sistema radical, convierte al sistema en una carga normal que mejora enormemente la cohesión del suelo, y por lo tanto se aumenta en gran medida la resistencia del suelo al cortante tangencial.

Trichanthera gigantea. Para el quiebrabarrigo no se observó raíz principal (Figuras 5

a y b), sino un gran conjunto de raíces laterales que se desprenden de la base del tallo, con diámetros entre 0,025 m y 0,080 m. Esto se debe a que la mayoría de las veces, estas especies se reproducen vegetativamente por estacas. Una proporción de estas raíces penetran dentro del suelo hasta alcanzar una profundidad cercana a los 1,60 m. A partir de estas raíces laterales se desprende un gran número de raíces secundarias, las cuales se extienden hacia los lados, alcanzando distancias entre 4 y 5 m (Figura 5 a). La mayor concentración de ellas se encuentra en la pared del perfil contraria al sentido de la pendiente, lo que permite prevenir en forma natural los movimientos en masa.

La gran densidad de raíces laterales, la facilidad de propagarse por vía vegetativa y la capacidad de desarrollarse en suelos degradados hacen que esta especie sea la ideal para prevenir deslizamientos, para recuperar suelos después de cualquier tipo de movimiento en masa.

Coffea arabica. El sistema radical de café se compone de una raíz principal bien definida con forma cónica (Figura 6 a), que inicia con un diámetro promedio aproximado de 0,020 m, hasta 0,40 m de profundidad, con un diámetro promedio



Figura 4. Distribución de raíces para guamo (*Inga codonantha*).

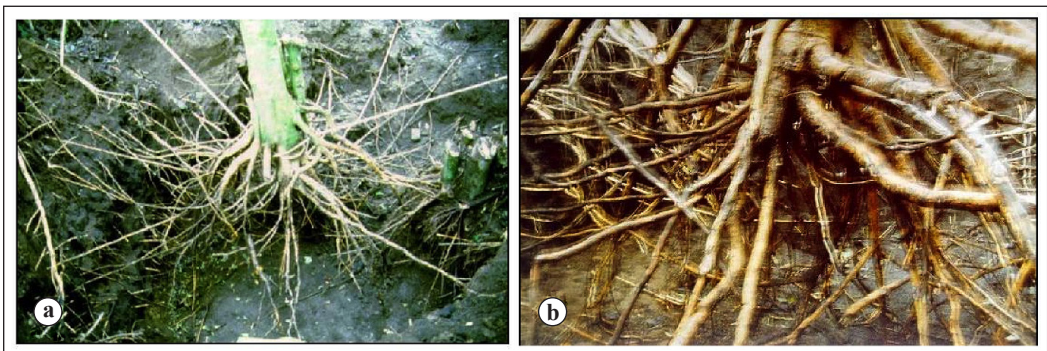


Figura 5. Distribución de raíces para queiebrabarrigo (*Trichanthera gigantea*). **a.** Distribución de raíces laterales; **b.** no se observa raíz principal.

entre 0,005 - 0,007 m, el cual disminuye bruscamente para finalizar entre 0,60 m - 0,70 m de diámetro promedio.

Las raíces laterales localizadas en su mayoría en los primeros 0,20 m, se distribuyen en forma radial y se extienden hasta 1,20 m, iniciando con diámetros entre 0,005 m y 0,025 m desde el tronco, constituidas por gran cantidad de raicillas entre 0,0001 - 0,001 m de diámetro en promedio. La mayor parte del sistema radical de esta especie se

encuentra distribuido en los primeros 0,40 m del perfil del suelo (Figuras 6 B y C).

Esta especie por tener un sistema radical poco profundo y pese a contar con una gran cantidad de raíces de diámetros muy pequeños, no le permite comportarse de una manera ideal para el control de movimientos masales, tanto superficiales como profundos. Por lo tanto, es muy importante su establecimiento como cultivo bajo un sistema agroforestal (cuyo componente arbóreo podría ser el

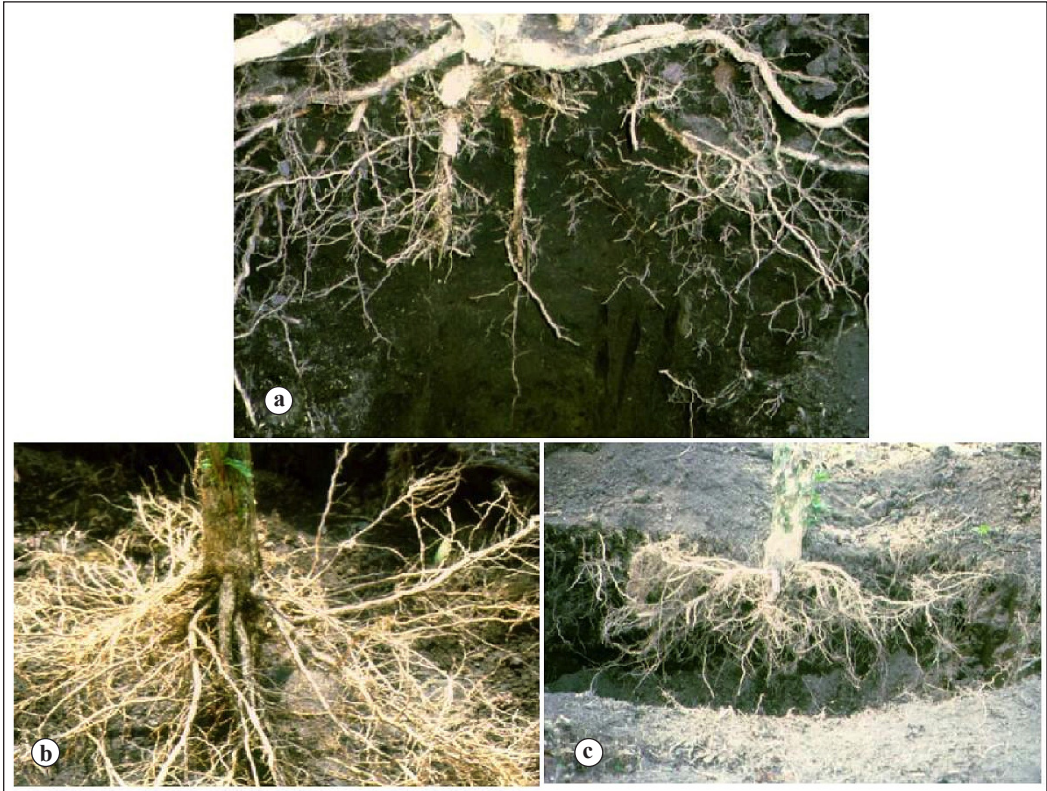


Figura 6. Distribución de raíces para el café (*Coffea arabica*). **a.** Raíz principal; **b.** y **c.** Distribución de raíces laterales.

guamo o el nogal cafetero), que prevenga movimientos masales en suelos de ladera altamente susceptibles a este tipo de procesos degradativos.

Influencia del sistema radical de las plantas en la resistencia del suelo al cortante tangencial

En la Figura 7, se presentan las curvas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria del suelo. En las pruebas de cortante tangencial efectuadas sobre el suelo libre de raíces se observa cómo la curva asciende rápidamente hasta llegar al punto de equilibrio, en el cual la resistencia al cortante tangencial es de 50,5 kPa. Una observación muy

importante es que la falla de la muestra ocurrió cuando la deformación unitaria fue del 2,2%. Seguidamente, la curva desciende en forma rápida hasta estabilizarse en un valor de resistencia residual de 20,1 kPa, el cual es inferior al valor de resistencia al cortante.

Para el caso de *C. alliodora*, las raíces de esta especie le permiten al suelo resistir esfuerzos cortantes de más de 100 kPa con solo 1,75% de deformación unitaria. A partir de este punto, el ascenso de la curva es más lento, hasta llegar al 20% de deformación unitaria, punto en el cual la muestra ha resistido la aplicación de esfuerzos tangenciales del orden de 115,2

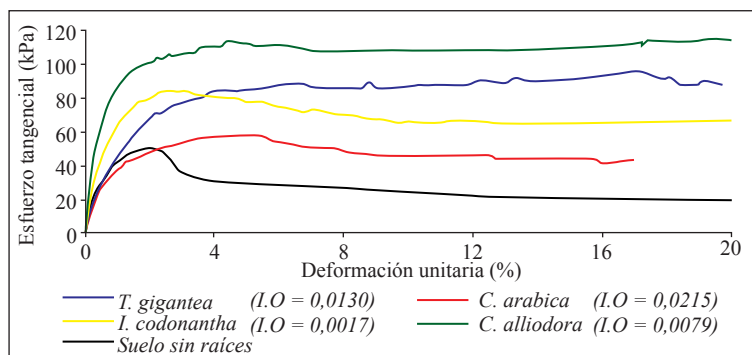


Figura 7. Curvas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria (*D.U.*) para suelos de la Unidad Chinchiná con y sin raíces de cuatro especies vegetales de la Zona Cafetera Colombiana.

kPa, pero sin que haya llegado al punto de equilibrio. En los otros casos la falla ocurre antes del 20% de deformación unitaria, pero la curva desciende lentamente alcanzando un valor de resistencia residual muy cercano al valor de la resistencia al cortante, como se observa en las curvas para las especies *I. codonantha*, *T. gigantea* y *C. arabica*, la resistencia al cortante tangencial fue de 84,83 kPa, 95,6 kPa y 57,8 kPa, respectivamente, y la resistencia residual fue de 66,6 kPa, 88,2kPa y 42,6 kPa, respectivamente.

Al comparar la curva para el suelo libre de raíces con las encontradas para las muestras de suelo con raíces, se observa que la tendencia en estos últimos casos es soportar esfuerzos cortantes mayores y deformaciones más grandes antes del suelo fallar por efecto del esfuerzo cortante tangencial. Otra característica de las muestras de suelo con raíces es que el descenso de la curva es más suave y que el valor de resistencia residual es más cercano al valor de la resistencia al cortante tangencial o resistencia última. Lo anterior implica que la presencia de raíces refuerza el suelo, aumentando su estabilidad en el caso en que actúen cargas cortantes más altas de las que podría soportar el suelo desprovisto de ellas. Esto es confirmado por Waldron (25), quien expone que las raíces de las plantas aumentan la resistencia a la ruptura del suelo, en forma directa por

reforzamiento mecánico e indirectamente por la extracción del agua del suelo por transpiración, haciendo que éste permanezca en condición de campo. El refuerzo mecánico se manifiesta en un aumento considerable en la componente cohesiva, debido al peso de la vegetación y a la interacción entre el suelo y las raíces (14).

La tendencia de las curvas encontradas es muy similar a las halladas por O'loughlin y Ziemer (14), Ekanayake *et al.* (4) y Hoyos y Mejía, (8), en cuyos trabajos se encontró que a medida que aumenta la densidad de raíces por unidad de área de suelo, la resistencia a esfuerzos cortantes es más alta y se alcanza en un desplazamiento mayor de la muestra.

En la Tabla 3 se muestran los valores promedio de resistencia al cortante tangencial (*R.C.*) del suelo con las raíces de cada una de las cuatro especies estudiadas, en las tres profundidades y el promedio de *R.C.* en todo el perfil.

A 0,20 m de profundidad (Tabla 3) el valor más alto para la resistencia al cortante tangencial se obtuvo en los sitios de muestreo con raíces de *C. alliodora* con 55,66 kPa, y los valores más bajos en suelo sin influencia de raíces (43,72 kPa) y en suelo con uso en café (44,19 kPa); estos resultados indican que en suelos susceptibles

Tabla 3. Resistencia promedio al cortante tangencial (*R.C.*) a tres profundidades, en suelos de la Unidad Chinchiná (*Acrudoxic melanudands*) con presencia de raíces de cuatro especies vegetales de la zona cafetera colombiana.

Especie	<i>R.C.</i> (kPa)		Incremento de <i>R.C.</i> (kPa)		Índice de ocupación (I.O)	
	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)
0,20 m de profundidad						
<i>T. gigantea</i>	52,63	29,61	18,47	66,54	0,0052	101,23
<i>C. arabica</i>	36,37	29,48	2,21	125,00	0,0059	130,41
<i>C. alliodora</i>	55,66	11,85	21,50	55,07	0,0017	41,04
<i>I. codonantha</i>	40,29	28,33	6,13	87,21	0,0006	103,6
Suelo sin raíces	34,16	26,31	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80 m de profundidad						
<i>T. gigantea</i>	70,53	29,83	27,13	59,71	0,0058	71,17
<i>C. arabica</i>	44,38	21,82	0,98	126,67	0,00	0,00
<i>C. alliodora</i>	64,97	17,77	21,57	74,21	0,0015	40,67
<i>I. codonantha</i>	60,31	23,28	16,92	56,72	0,0015	45,45
Suelo sin raíces	43,40	23,21	0,00	0,00	0,00	0,00
1,20 m de profundidad						
<i>T. gigantea</i>	57,54	21,97	3,92	89,63	0,0024	96,77
<i>C. arabica</i>	51,81	16,99	-1,80	98,76	0,00	0,00
<i>C. alliodora</i>	76,00	27,81	22,39	106,6	0,0035	73,58
<i>I. codonantha</i>	76,33	22,98	22,72	91,44	0,0021	74,65
Suelo sin raíces	53,61	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00
20-120 cm de profundidad						
<i>C. alliodora</i>	65,54a	24,44	21,82	77,28	0,0022	77,84
<i>T. gigantea</i>	60,23a	29,18	16,51	99,15	0,0045	92,41
<i>I. codonantha</i>	58,98a	24,44	15,26	77,28	0,0014	77,84
<i>C. arabica</i>	44,19b	26,41	0,46	89,79	0,0059	130,41
Suelo sin raíces	43,72b	28,25	0,00	0,00	0,00	0,00

Letras no comunes indican diferencias estadísticas, según prueba de Bunferroni ($P < 0,05$); C.V : Coeficiente de variación.

a los movimientos masales, caso de la Unidad Parnaso (*Typic eutropepts*), por su condición arcillosa y de baja permeabilidad, el cultivo de café como monocultivo no es garantía para estabilizar y prevenir los movimientos masales, sino que se deben usar y manejar los suelos con sistemas agroforestales. Según Rivera (20), al medir la permeabilidad en suelo de la Unidad Parnaso (*Typic eutropepts*) cultivado en café como monocultivo, encontró valores de permeabilidad, que van de 2,18 a 0,03 cm.h^{-1} para las profundidades de 0 a 10 y 40 a 60 cm, respectivamente. Estos contenidos son

clasificados como permeabilidad moderada, según O Neal (1949), citado por Lal (9) y Anaya *et al.* (1). Así como clasificación muy baja según O Neal (1949), citado por Lal (9), y muy lenta según Anaya *et al.* (1) para la profundidad de 40 a 60 cm. En la profundidad de 10 a 40 cm se presenta una permeabilidad de 0,05 a 0,03 cm.h^{-1} , respectivamente, la cual es clasificada como muy baja y muy lenta, según O Neal (1949), citado por Lal (9) y Anaya *et al.* (1), respectivamente. La discontinuidad en la permeabilidad dentro del perfil de estos suelos, es lo que origina desprendimientos

superficiales en épocas muy lluviosas, por saturación de los primeros 0 a 10 cm de profundidad del suelo, capa que reposa sobre horizontes menos permeables, que obran como planos de deslizamiento (Figura 8). Los desprendimientos de estas capas superficiales se deben principalmente a una disminución de la resistencia del suelo al cortante tangencial, por un incremento de la presión de poros al saturarse, disminución de la cohesión entre partículas del suelo y a una fricción menor entre ellas (11).

A 0,80 m de profundidad el promedio más alto de resistencia al cortante tangencial, se consiguió con las raíces de *T. gigantea* con 70,53 kPa y el valor promedio más bajo en suelos sin raíces (43,40 KPa). A 1,20 m la tendencia fue muy similar entre las especies *C. alliodora* e *I. codonantha* con valores de 76 kPa para cada una. A 0,80 m y 1,20 m de profundidad no se encontraron raíces de café, por lo que la resistencia de esta especie al cortante tangencial fue muy similar a la del suelo sin raíces.

Estadísticamente no hubo diferencias significativas para la resistencia al cortante tangencial entre las especies de porte arbóreo (*C. alliodora*, *T. gigantea* e *I. codonantha*), pero sí se observaron deferencias estadísticas entre estas tres especies y el grupo conformado por la especie *C. arabica* y el suelo libre de raíces. Tampoco se observaron diferencias entre el suelo con raíces de café y el suelo libre de raíces (Tabla 3).

Este resultado demuestra la importancia que tiene la vegetación arbórea en la estabilización de suelos de ladera contra los deslizamientos en épocas de invierno, principalmente en lo profundo de su perfil del suelo, ya que las raíces que se encuentran a profundidades mayores, así mismo refuerzan mecánicamente el terreno a esas profundidades, lo cual hace que haya un contacto mayor de fricción entre las partículas del suelo y la superficie externa de la raíz, dando lugar a que ante la aplicación de esfuerzos de cortante tangencial, la raíz transmita totalmente sus



Figura 8. Suelo de la unidad Parnaso (*Typic eutropepts*), con uso en monocultivo de café. Se observa un movimiento en masa superficial hasta donde llega el sistema radical superficial del cultivo, indicando la necesidad de establecer un sistema agroforestal, con árboles de sistema radical más profundo, como refuerzo mecánico para el amarre del suelo.

propiedades mecánicas de resistencia a esfuerzos de tensión, conformando lo que Styczen y Morgan (23) denominan matriz de alta resistencia al cortante tangencial. Esto indica que una de las razones por las cuales se han incrementado los deslizamientos en el país y gran parte del trópico, es por el cambio de uso del suelo, especialmente en las laderas, pasando de bosques naturales con alta capacidad de refuerzo mecánico al suelo a grandes profundidades, por pasturas con sistemas radicales muy superficiales (0,30 m), que ofrecen el refuerzo sólo en los primeros 30 cm del suelo, razón por la cual se desplaza el terreno con la pastura, dando lugar a movimientos en masa de tipo superficial. La tala completa de la vegetación arbórea para el establecimiento de pastos y cultivos genera una inestabilidad de las formaciones superficiales expresada por una gran cantidad de movimientos en masa. En pendientes fuertes parte de la estabilidad se debe al enraizamiento (Rice, (1977) citado por Florez (5)), tanto por el anclaje vertical como por el horizontal (Gray (1971) y Dyrnes (1967), citados por Florez (5)). Por consiguiente, cuando se remueve la vegetación se acelera la ocurrencia de deslizamientos, debido a que aumentan en un 60% las presiones intersticiales que disminuyen la resistencia a la ruptura del suelo (Swanston (1969), citado por Ziemer (28)).

Índice de ocupación de raíces. Se refiere al número de raíces por unidad de área de suelo, ya que si existe un número mayor de raíces en el plano de falla, éstas aumentarán el refuerzo mecánico del suelo, como se observa en las correlaciones de la Tabla 4, donde se encontró correlación directa entre el incremento del cortante tangencial (*R.C.*) y el índice de ocupación (*I.O.*), con niveles de significancia superiores al 90%, lo que indica que a mayor número de raíces en

el suelo, aumenta la *R.C.* de éste. Estos resultados son una herramienta muy valiosa para demostrar que en la conservación de suelos de ladera, los tratamientos de tipo biológico deben ser la primera opción. Por lo tanto, para la prevención y control de movimientos masales se recomiendan trabajos de bioingeniería, los cuales por el efecto positivo de la vegetación, han demostrado ser efectivos, económicos y de fácil ejecución, partiendo de un buen conocimiento de la relación causa-efecto de los procesos degradativos a la luz de las relaciones Roca-Suelo-Grado y Longitud de la pendiente-Clima-Vegetación-Animal-Infraestructura-Hombre (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22). Petrone y Preti (15) realizaron estudios de bioingeniería mediante pruebas con diversas especies nativas en Río Blanco, Nicaragua. Entre las especies utilizadas se evaluaron *Gliricidia sepium* (madero negro) y *Tabebuia rosea* (roble macuelizo) las cuales mostraron ser las más adecuadas para la bioingeniería del suelo en laderas, mientras que *Erythrina fusca* (helequeme) mostró un comportamiento exitoso sólo en la protección de riberas de ríos y quebradas.

Cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. En la Tabla 5 se observa para el suelo libre de raíces una cohesión de 21,39 kPa y un ángulo de fricción interna de 30°. En el terreno con árboles de café la cohesión es de 23,01 kPa, con un ángulo de fricción interna de 29,5°. En el lote de quiebrabarrigo se obtuvo una cohesión de 25,47 kPa y un ángulo de fricción interna de 30°. Estos resultados concuerdan con lo establecido por O'loughlin y Ziemer (14), quienes sostienen que las raíces de los árboles mejoran ampliamente la cohesión del suelo, pero no afectan considerablemente el ángulo de fricción interna, por ser éste un parámetro propio de la textura del suelo y no de las raíces.

Tabla 4. Coeficientes de correlación lineal simple entre el índice de ocupación (*I.O.*) y el incremento de la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial (*R.C.*) dado al suelo por las raíces de cuatro especies vegetales de la zona cafetera colombiana.

Profundidad (cm)	Relación entre <i>R.C.</i> y el <i>I.O.</i> de cada especie vegetal							
	<i>C. alliodora</i>		<i>T. gigantea</i>		<i>I. codonantha</i>		<i>C. arabica</i>	
	<i>r</i>	c.v	<i>r</i>	c.v	<i>r</i>	c.v	<i>r</i>	c.v
20	0,82*	34,8	0,92**	28,8	0,69**	36,8	0,85**	72,2
80	0,86*	41,2	0,80	40,0	0,96**	17,9	-	-
120	0,85*	62,6	0,87**	179,2	0,88*	48,7	-	-
20-120	0,69**	57,7	0,82**	58,2	0,92**	39,2	-	-

r: coeficiente de correlación lineal simple; c.v: coeficiente de variación; *($P < 0,05$): Significativo; **($P < 0,01$): altamente significativo.

Tabla 5. Cohesión y ángulo de fricción interna para suelos de la unidad Chinchiná, con raíces de cuatro especies vegetales de la zona cafetera colombiana.

Especie vegetal	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (grados)	c.v.	R2
<i>Cordia alliodora</i>	56,22N.S	17	24,68	0,04NS
<i>Trichanthera gigantea</i>	25,47**	30	20,94	0,51**
<i>Inga codonantha</i>	36,51N.S	30	33,07	0,14NS
<i>Coffea arabica</i>	23,01**	29,5	21,44	0,37**
Suelo libre de raíces	21,39**	30	4,61	0,95**

** Indica que el modelo de predicción es altamente significativo ($P < 0,01$); *indica que el modelo de predicción es significativo ($P < 0,05$); N.S indica que el modelo de predicción no es significativo; c.v.: coeficiente de variación; R2: coeficiente de determinación.

Las regresiones efectuadas para los lotes de guamo y nogal cafetero no fueron significativas estadísticamente y tuvieron coeficientes de determinación (R^2) muy bajos, razón por la cual no se pudieron determinar con confiabilidad la cohesión y ángulo de fricción interna. Este comportamiento en las curvas de regresión para estas dos especies se debió posiblemente a la gran resistencia mecánica de sus raíces, por lo que para estas especies se debe emplear un mayor número de muestras con el fin de tener una curva ajustada y confiable.

Predicción de la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial. La resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial solo fue explicada por los modelos desarrollados con la variable aleatoria índice de ocupación. En todos los casos, la

resistencia a esfuerzos de cortante tangencial tuvo un comportamiento de tipo cuadrático, con una proporcionalidad directa entre el índice de ocupación y la resistencia al cortante tangencial del suelo. A 0,2 m de profundidad la mejor ecuación de predicción la tuvo el nogal cafetero con un coeficiente de determinación de 0,97, seguido por quiebrabarrigo con un coeficiente de determinación de 0,83 (Figura 9) y café con un coeficiente de determinación de 0,75 (Figura 10).

De 0 a 1,2 m de profundidad la mejor ecuación de predicción se registró con el guamo, con un coeficiente de determinación de 0,71, seguido por nogal cafetero con un coeficiente de determinación de 0,63, y el quiebrabarrigo con un coeficiente de determinación de 0,52 (Figura 11).

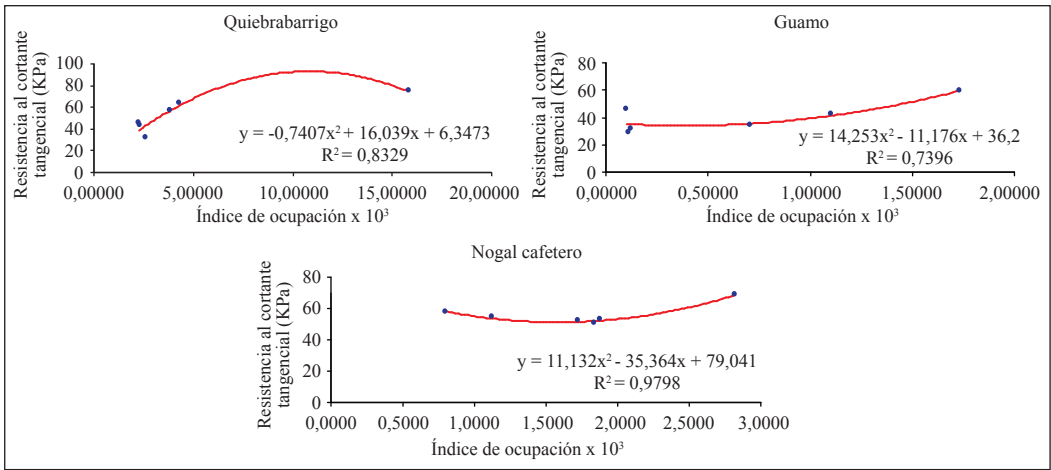


Figura 9. Efecto del grado de ocupación de las raíces de tres especies arbóreas (*Trichanthera gigantea*, *Cordia alliodora* e *Inga codonantha*) sobre la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial en suelos de la unidad Chinchiná, a 0,2 m de profundidad.

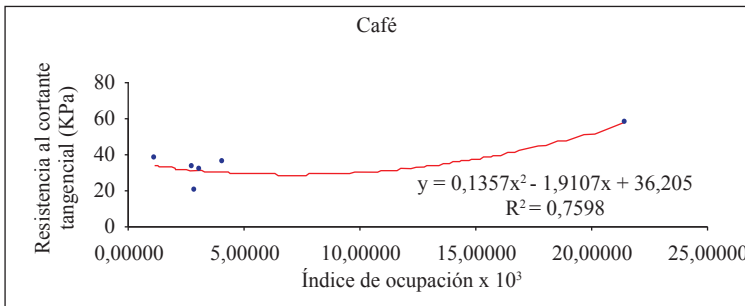


Figura 10. Efecto del grado de ocupación de las raíces de café sobre la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial en suelos de la unidad Chinchiná, a 0,2 m de profundidad.

Finalmente, puede concluirse que:

- Las raíces de los árboles y arbustos son elementos estructurales importantes en la estabilidad del suelo, principalmente por sus características físicas como su resistencia alta a la tensión cuando son sometidas a la acción de fuerzas de corte y tracción, y por sus características biológicas como su cantidad, tamaño y distribución dentro del suelo.
- Las especies nogal cafetero y guamo dieron al suelo una alta resistencia al cortante tangencial pico en todo el

perfil, a pesar de que el área ocupada por sus raíces en el plano de falla se consideró como la más baja respecto a las demás especies. Esto se debe a que estas raíces se comportan como materiales elásticos que al deformarse pueden soportar esfuerzos cortantes y de tracción más amplios que las raíces de las otras especies.

- En promedio, la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial hallada en el suelo con raíces de quiebrabarrigo de todo el perfil fue inferior a la hallada en nogal cafetero, y muy cercana

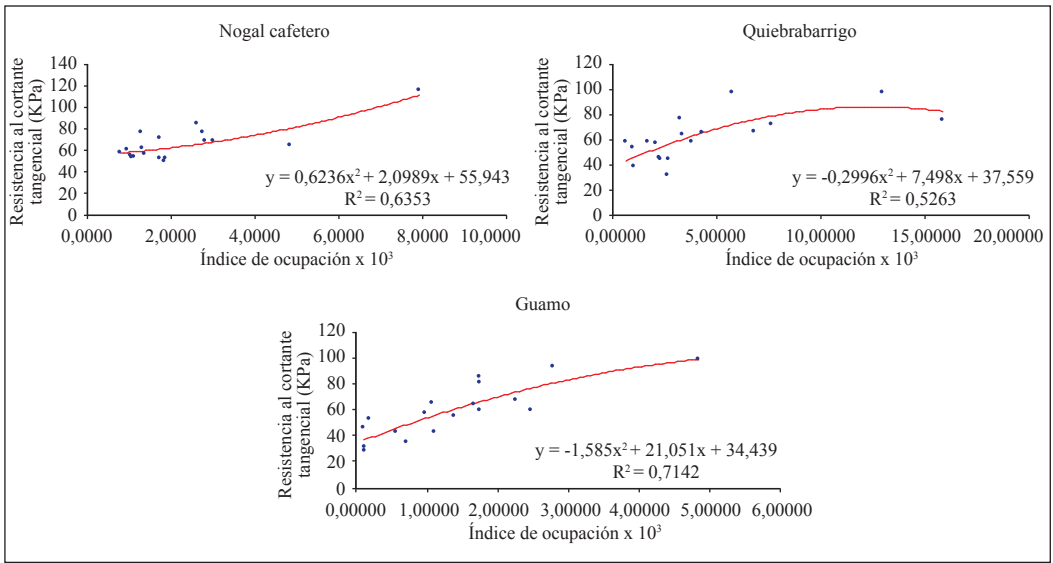


Figura 11. Efecto del grado de ocupación de las raíces de tres especies arbóreas (*Trichanthera gigantea*, *Cordia alliodora* e *Inga codonantha*) sobre la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial en suelos de la unidad Chinchiná, de 0 a 1,2 m de profundidad.

al valor encontrado para guamo, a pesar de tener mayor densidad de raíces atravesando el plano de falla. Esto indica que el efecto que esta especie tiene sobre la estabilidad del suelo se debe principalmente a la alta cantidad de raíces, más que a su resistencia individual a esfuerzos de corte y tracción, lo cual se observa claramente a 0,8 m de profundidad, donde la especie le dio al suelo la mayor resistencia a la cortante tangencial, y además tuvo el índice de ocupación promedio más alto de las tres profundidades de trabajo.

- Es un error considerar a los árboles ubicados en taludes y laderas como los causantes de los movimientos masales por su peso, ya que, con base en los resultados del presente trabajo queda demostrado que por el contrario son una solución económica, efectiva y además

preventiva debido a su refuerzo mecánico y a su capacidad evapotranspiradora, y a que su peso queda distribuido en toda el área del sistema radical, conduciendo a que la presión sobre el terreno, sea insignificante ($0,58 \text{ Kg.m}^{-2}$ en promedio aproximadamente).

- Los resultados encontrados en este trabajo son una herramienta valiosa para demostrar que en la conservación de suelos de ladera los tratamientos de tipo biológico deben ser la primera opción. Por lo tanto, para la prevención y control de movimientos masales se recomiendan los trabajos de bioingeniería, basados en la relación: Causa – Efecto, luego de un buen inventario a la luz de las relaciones: Roca-Suelo-Grado y Longitud de la Pendiente-Clima-Planta-Animal-Infraestructura-Hombre, los cuales han demostrado ser muy efectivos, económicos y de fácil ejecución.

AGRADECIMIENTOS

A la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia por su apoyo económico y logístico. A las Disciplinas de Suelos e Ingeniería Agrícola de Cenicafé. Al personal de la Estación Central Naranjal.

LITERATURA CITADA

1. ANAYA G., M.; MARTÍNEZ M., M.R.; TRUEBA C., A.; FIGUEROAS, B.; FERNÁNDEZ M., O. Manual de conservación de suelos y del agua. Chapingo : Colegio de postgraduados, 1977. 581 p.
2. COKER, I.; FLORES, R. A device for extracting large intact soil samples developed and used in a remote region of Bolivia. [En línea]. *Electronical journal of geotechnical engineering* Vol. 5. 2000. Disponible en internet: <http://www.ejge.com/2000/Ppr0003/Abs0003.htm>. Consultado en enero de 2001.
3. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. USDA FOREST SERVICE. A soil bioengineering guide for streambank and lakeshore stabilization. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.fs.fed.us/publications/soil-bio-guide/guide/chapter5.pdf> Consultado en Junio 1 de 2012.
4. EKANAYAKE, J.C.; MARDEN, M.; WATSON, A.; ROWAN, D. Tree roots and slope stability: A comparison between *Pinus radiata* and *kanuka*. *New zealand journal of forestry science* 27(2):216-233. 1997.
5. FLÓREZ, A. Geomorfología del área Manizales – Chinchiná, cordillera central, Colombia. *Ámsterdam : Universidad van Ámsterdam*, 1986. 159 p. Tesis doctoral.
6. GRAY, D.H.; SOTIR, R.B. Biotechnical and soil bioengineering: Slope stabilization, a practical guide for erosion control. New York : John Wiley and sons, 1996. 378 p.
7. HOLANDA, F.S.R.; GOMES, L.G.N.; ROCHA, I.P.J.DA; SANTOS, T.T.; ARAUJO, R.N. DE, FILHO; VIEIRA, T.R.S.; MESQUITA, J.B. Initial development of forest species on riparian vegetation recovery at riverbanks under soil bioengineering technique. [En línea]. Sao Cristovao : Universidade federal de Sergipe, 2010. Disponible en internet: <http://www.ufsm.br/cienciaflorestal>. Consultado en Junio 12 de 2012.
8. HOYOS, F.; MEJÍA, M. Las raíces de la estabilidad. *Boletín de vías Universidad Nacional de Colombia* 26(92):46-66. 1999.
9. LAL, R. Soil erosion in the Tropics: Principles and management. New York : MacGraw Hill, 1990. 580 p.
10. LAMMERANNER, W.; RAUCH, H.P.; LAAHA, G. Implementation and monitoring of soil bioengineering measures at a landslide in the middle mountains of Nepal. [En línea]. Vienna : Institute of soil bioengineering and landscape construction : University of natural resources and applied life sciences, 2004. Disponible en internet: <http://ovidsp.tx.ovid.com/sp-3.5.1a/ovidweb.cgi?&S=HAEFBFAAOMDDHCIDNICALNFGCGGCFAA00&Complete+Reference=S.sh.14|9|1>. Consultado en Junio 13 de 2012.
11. MÁRQUEZ, C.G. Propiedades ingenieriles de los suelos. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 1984. 243 p.
12. MOLINERO, L.M. Análisis de subgrupos y de objetivos secundarios: el problema de las comparaciones múltiples, comparación de valores basales. [en línea]. Madrid : seh-lilha, 2002. <http://www.seh-lilha.org/subgrupos.htm>. Consultado en mayo 31 de 2012.
13. MORGAN, R.P.C.; RICKSON, R.J. Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. London : E & FN Spon, 1995. 271 P.
14. O'LOUGHLIN, C.; ZIEMER, R.R. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests. [En Línea]. P. 70-78. Oregon : Proceedings of i.u.f.r.o. workshop ecology of subalpine ecosystems, 1982. Disponible en internet: <http://www.rsl.psw.fs.fed.us>
15. PETRONE, A.; PRETI, F. Soil bioengineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area. [En línea]. Florence : DEISTAF, 2010. Disponible en internet: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/239/2010/hess-14-239-2010.pdf>. Consultado en Junio 12 de 2012.
16. RIVERA P., J.H. Sistemas de drenaje con filtros vivos para la estabilización y restauración de movimientos masales en zonas de ladera. Chinchiná : Cenicafé, 2011. 12 p. (Avances Técnicos No. 413).
17. RIVERAP., J.H. Utilización del nacedero *Trichanthera gigantea* (H.& B.) Nees. para la prevención y recuperación de áreas degradadas por erosión y remociones masales en suelos de ladera colombiana. p. 54-62. En: Seminario taller tres especies vegetales

- promisorias para sistemas sostenibles de producción agropecuaria: Nacedero, Botón de oro *Tithonia diversifolia* y Bore *Alocasia macrorrhiza*. Cali : CIPAV, 2002.
18. RIVERA P., J.H. Manejo y estabilización de taludes en zonas de ladera mediante tratamientos de bioingeniería. Chinchiná : Cenicafé, 2001. 8 p. (Avances Técnicos No. 291).
 19. RIVERA P., J.H. Control de derrumbes y negativos en carreteras, mediante tratamientos de tipo biológico. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 8 p. (Avances Técnicos No. 264).
 20. RIVERA P., J.H. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. 525 p. Tesis: Philosophy doctor.
 21. RIVERA P., J.H. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. Chinchiná : Cenicafé, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 256).
 22. RIVERA P., J.H.; SINISTERRA R., J.A. Uso social de la bioingeniería para el control de la erosión severa. Cali : CIPAV, 2006. 110 p.
 23. STYCZEN, M.E.; MORGAN, R.P.C. Engineering properties of vegetation. p. 7-57. En: MORGAN, R.P.C.; RICKSON R.J. Slope stabilization and erosion control; A bioengineering approach. London : E. y F.N Spon, 1995.
 24. SUÁREZ, S.; ÁLVAREZ, O.J.; BALDIÓN, V. Estudio detallado de suelos y clima estación central Naranjal. Chinchiná : Cenicafé, 1994. 87 p.
 25. WALDRON, L.J. The shear resistance of root-permeated homogeneous y stratified soil. Soil science society of american journal 4:843-849. 1977.
 26. WALDRON, L.J.; DAKESSIAN, S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil science 132(6):427-435. 1981.
 27. WALDRON, L.J., DAKESSIAN, S.; NEMSON, J.A. Shear resistance enhancement of 1.22 meter diameter soil cross sections by pine y alfalfa roots. Soil science society of american journal 47:9-14. 1983.
 28. ZIEMER, R.R. The role of vegetation in the stability of rooted slopes. [En Línea]. Kyoto : International union of forestry research: World congress, 1981. Disponible en internet: <http://www.rsl.psw.fs.fed.us>. Consultado en Diciembre de 2000.

PRODUCCIÓN DE ALCOHOL A PARTIR DE LA PULPA DE CAFÉ

Nelson Rodríguez Valencia*

RODRÍGUEZ V., N. Producción de alcohol a partir de la pulpa de café. Revista Cenicafé 64 (2): 78-93. 2013

Para evaluar el aprovechamiento de la pulpa del café Variedad Castillo® en la producción de alcohol, se evaluaron 25 tratamientos, en un diseño completamente aleatorio en arreglo factorial 5x5, con cinco tipos de hidrólisis (natural, ácida, alcalina, enzimática con celulasas y enzimática con celulasas y pectinasas) y cinco inóculos de levadura *Saccharomyces cerevisiae* (natural, dos levaduras prensadas comerciales y dos levaduras secas comerciales). Se utilizó pulpa proveniente del despulpado sin agua, con menos de 1 h de obtención, la hidrólisis ácida se realizó con ácido sulfúrico concentrado, la hidrólisis alcalina con hidróxido de sodio al 32%, la hidrólisis enzimática con celulasas y pectinasas comerciales. Se evaluó el pH, porcentaje de humedad y °Brix, en la pulpa y en las muestras finales de alcohol rectificado y deshidratado se determinaron los contenidos de alcohol y congéneres. El análisis de varianza mostró efecto de la interacción hidrólisis-inóculo en los rendimientos de alcohol y en el pH, °Brix y gravedad específica. La prueba de constrate al 5% mostró que los tratamientos con mayor rendimiento en la producción de alcohol fueron aquellos que involucraron la hidrólisis enzimática con celulasas (22,12 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca), seguida de la hidrólisis enzimática con celulasas-pectinasas (20,96 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca) y los tratamientos sin hidrólisis con levaduras comerciales (18,30 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca). Los mayores contenidos de etanol se alcanzaron en los tratamientos: con hidrólisis enzimática con celulasas (97,78%), sin hidrólisis (96,92%), con hidrólisis enzimática utilizando celulasas y pectinasas (95,76%), con hidrólisis alcalina (95,59%) y con hidrólisis ácida (93,97%).

Palabras clave: Biocombustibles, alcohol carburante, subproductos del café, fermentación alcohólica.

ALCOHOL PRODUCTION FROM COFFEE PULP

In order to evaluate the use of coffee pulp from the variety Castillo® in ethanol production, we evaluated 25 treatments in a completely randomized factorial arrangement 5 x 5, involving 5 types of hydrolysis (natural, acidic, alkaline, enzymatic with cellulases and pectinases) and 5 of the yeast inocula *Saccharomyces cerevisiae* (natural, two commercial yeast and two yeast commercial dry). The pulp of coffee, no water from the pulping of the fruit, was used less than 1 hour generated, acid hydrolysis was performed with concentrated sulfuric acid, alkaline hydrolysis with sodium hydroxide sodium to 32%, enzymatic hydrolysis was performed by adding commercial cellulases and pectinases. A pulp samples were evaluated pH, % humidity and °Brix and the final samples rectified and dehydrated alcohol were evaluated alcohol content and the main congeners. Analysis of variance showed the interaction effect of hydrolysis-yeast yields of alcohol and the pH, °Brix and Specific Gravity. Constrate test showed 5% higher performance treatments in the production of alcohol and among which there were no statistical differences were those that involved the enzymatic hydrolysis with cellulases (22,12 mL.kg⁻¹ of fresh pulp), followed by enzymatic hydrolysis with cellulases-pectinases (20,96 mL.kg⁻¹ of fresh pulp) and treatments without hydrolysis (18,30 mL.kg⁻¹ of fresh pulp). The highest mean levels of ethanol were achieved for treatments with cellulase enzymatic hydrolysis (97,78%), followed by treatment without hydrolysis (96,92%) of treatment with enzymatic hydrolysis using cellulases and pectinases (95,76%), treatment with alkaline hydrolysis (95,59%) and treatment with acid hydrolysis (93,97%).

Keywords: Biofuels, fuel alcohol, coffee pulp, coffee byproducts, alcoholic fermentation.

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

El fruto de café está compuesto por la pulpa, el mucílago y la semilla. La pulpa está formada por el exocarpio (epidermis) y parte del mesocarpio (mucílago); el color de la epidermis varía de verde a rojo o amarillo, dependiendo de la variedad de café y del grado de maduración del fruto (25). La pulpa es el primer producto que se obtiene en la etapa de beneficio del fruto y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco (25).

La pulpa de café tiene un contenido de humedad entre el 76% y el 80%. Está constituida por materia orgánica (entre el 88% y el 89% en base seca) y cenizas (entre el 11% y el 12% en base seca) (9, 34). Además, el contenido de otras sustancias en base seca es de 1,10% - 1,30% de nitrógeno, 29,50% de celulosa, 4,60% de hemicelulosa, 16,90% de lignina, 0,75% de cafeína y 3,70% de taninos (9). Rodríguez (31), reporta contenidos medios, en base seca, de 17,31% para azúcares reductores y de 18,49% para azúcares totales, con un valor medio de 3,59°Brix. De la pulpa de café fresca se han aislado levaduras de los géneros *Candida* sp., *Rhodotorula* sp. y *Toroplosis* sp. (6).

En Colombia, el promedio de la producción de pulpa de café es de 2,25 t.ha-año⁻¹ (29). Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162.900 t de pulpa fresca, que si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación en excretas y orina, equivalente a la generada por una población de 868.736 habitantes, durante un año. Los programas de renovación de cafetales establecidos por la Federación Nacional de Cafeteros propenden por estabilizar la producción en las próximas décadas, en 18 millones de sacos de café almendra, valores con los cuales la producción de pulpa de

café tendría un incremento cercano al 50%. En este sentido, si no se buscan alternativas atractivas para el uso de este subproducto puede generarse un gran impacto ambiental, sobre todo cuando ésta se dispone en cielo abierto hasta su descomposición total (produciendo gases y lixiviados).

A través del tiempo se han realizado diferentes investigaciones sobre la composición química y microbiológica de la pulpa de café, con el fin de obtener productos de valor agregado, tales como: levaduras alimenticias (15), alcohol (14), colorantes (13), biogás (10), abono orgánico (17, 24), pectinas (12, 31), miel de café (38), alimentos para animales (7, 9), baterías eléctricas (9, 11), materiales de construcción (9), productos químicos (9), hongos comestibles y medicinales (32, 33, 34) y ensilaje, como método de conservación para su posterior uso en la elaboración de otros productos (30).

De igual manera, la pulpa de café seca se ha utilizado como combustible directo. Porres *et al.* (27), reportan un poder calorífico de 15,88 MJ.kg⁻¹ de pulpa seca, con un consumo en el secado mecánico de la misma de 36,92 MJ.kg⁻¹, para un balance energético negativo en el proceso, debido a que por cada unidad de energía aplicada en el secado de la pulpa sólo se generaron 0,43 unidades de energía en la combustión del producto seco.

La producción de biocombustibles como bioetanol, biobutanol y biogás, a partir de la pulpa de café, es una alternativa que se está investigando, sobre todo por ser biocombustibles de segunda generación, los cuales se constituyen en fuentes de energía renovable, que permiten diversificar la matriz energética del país, y que a la vez reducen la emisión de gases de efecto invernadero, siendo amigables con el medio ambiente, sin alterar la productividad cafetera, ayudando a

contrarrestar la crisis alimentaria, ya que no se hace uso de productos destinados para la alimentación humana.

Para la producción de biogás a partir de la pulpa de café fresca, Arcila (4) reporta rendimientos de 25 L de biogás por 1,0 kg de pulpa alimentada a los digestores, equivalente a un poder calorífico de 0,54 MJ.kg⁻¹ de pulpa fresca.

Calle (9) reporta que en la fermentación de la pulpa y del mucílago de café predomina la formación de alcohol etílico, por lo que para una producción cafetera rentable recomienda obtener los materiales fermentables de la pulpa y el mucílago sin la utilización de agua, con el fin de contrarrestar la fermentación acética y asegurar el desarrollo óptimo de las levaduras. Así mismo, estudió las condiciones para la obtención de alcohol a partir de la pulpa y el mucílago de café, encontrando que de los subproductos generados en el beneficio de 100 kg de café cereza, en promedio pueden obtenerse 1,2 L de alcohol etílico de 85°, equivalente a un rendimiento de 14 L de alcohol anhidro por tonelada de residuos.

Cabrera *et al.* (8), reportan la obtención de 2,0 a 2,5 g de etanol en 48 h, cuando la fermentación se realiza a 28°C, a partir de 200 g de frutos de café. Igualmente, reportan mejoras en los rendimientos del proceso en un 20%, en 48 h, cuando realizaron un pretratamiento con una bacteria pectinolítica como *Erwinia herbicola* en asocio con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*.

Rodríguez (29) reporta rendimientos de alcohol equivalentes a 12,31 mL de etanol por 1,0 kg de pulpa fresca: A partir de los jugos provenientes del prensado de la pulpa de café fresca, reporta rendimientos de 47,95 mL.L⁻¹ de jugo del primer prensado (contenido

de etanol de 98,43%) y de 22,62 mL.L⁻¹ de jugo del segundo prensado (contenido de etanol de 96,60%), realizado a las 24 horas sobre el residuo del primer prensado.

Rodríguez y Zambrano (35), en estudios de fermentación alcohólica, utilizando varias cepas de levaduras, en promedio registraron rendimientos de 25,17 mL de etanol por 1,0 kg de pulpa fresca.

El propósito de la investigación fue determinar los rendimientos de producción de etanol a partir de la pulpa de café proveniente del proceso de beneficio del fruto de café Variedad Castillo®, evaluando diferentes tipos de hidrólisis y diferentes inóculos comerciales de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, con el fin de determinar su potencial para la producción de bioetanol de segunda generación, de forma que se contribuya a diversificar la matriz energética nacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló durante el primer semestre del año 2010, en el laboratorio de Biodigestión, ubicado en el sector de La Granja de Cenicafé, a una altitud de 1.310 m (21).

Materiales

Pulpa de café. El material se obtuvo del beneficio de 150 kg de café cereza Variedad Castillo® Naranja, sin seleccionar, en un equipo Becolsub 300, dotado de un desmucilagador mecánico operado con un caudal de agua de 550 mL.min⁻¹.

Microorganismos. Se evaluaron cuatro cepas comerciales de *Saccharomyces cerevisiae* (Prensada 1-P1, Prensada 2-P2, Seca 1-S1 y seca 2-S2), una enzima comercial celulolítica-EC y una enzima comercial pectinolítica-EP.

Tratamientos. Se evaluaron 25 tratamientos así: Cinco tipos de hidrólisis (natural, ácida, alcalina, enzimática con celulasas, enzimática con celulasas y pectinasas) y cinco tipos de inóculo (natural, levadura prensada 1, levadura prensada 2, levadura seca 1 y levadura seca 2).

Unidad experimental. Estuvo conformada por una muestra de pulpa de 0,5 kg. Cada tratamiento estuvo constituido por seis unidades experimentales. Las unidades experimentales se asignaron a los tratamientos de acuerdo con el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial 5 x 5.

Condiciones de proceso

- Se utilizó pulpa fresca, con menos de 1 h de generada.
- Se utilizó una relación de 1,5 L de agua por 1,0 kg de pulpa fresca.
- La hidrólisis ácida se realizó con ácido sulfúrico concentrado (8,7 mL/0,5 kg de pulpa) y se adicionó Na_2SO_3 (11,25 g/0,5 kg de pulpa) (31). Luego, el material se sometió a un proceso de autoclave a 121°C durante 20 min. (39).
- La hidrólisis alcalina se realizó con hidróxido de sodio al 32% (10 mL/0,5 kg de pulpa) y se adicionó Na_2SO_3 (11,25 g/0,5 kg de pulpa) (31). Posteriormente, el material se sometió a un proceso de autoclave a 121°C durante 20 min. (39).
- La hidrólisis enzimática se realizó adicionando 0,5 mL de enzimas celulasas/0,5 kg de pulpa, con un pH en el rango entre 4,5 y 5,5 y se sometió durante 60 min. a una temperatura de 60°C, luego se dejó a temperatura ambiente durante 8 h. Cuando se utilizaron pectinasas se adicionaron

0,1 mL de enzimas/0,5 kg de pulpa y se sometió al mismo tratamiento térmico.

- Una vez terminada la etapa de hidrólisis, el pH del mosto obtenido se adecuó a un valor de $5,0 \pm 0,5$ (18), utilizando ácido sulfúrico o hidróxido de sodio, y se adicionaron las cepas de levadura en una proporción de 2,5% p/v, para las levaduras prensadas (37) y del 1% p/v para la levadura seca (recomendación de la casa fabricante), a una temperatura de incubación de 30°C (18).
- En el proceso de destilación se adicionó aceite vegetal al 0,1% v/v como antiespumante.
- Las unidades experimentales se agitaron manualmente, seis veces al día (37).
- El tiempo de fermentación alcohólica se fijó en 15 h (37).

Beneficio. Se utilizaron tandas de 150 kg de café cereza Variedad Castillo Naranjal® sin seleccionar, proveniente de la Estación Central Naranjal. Una vez se recibió el café cereza se inició el proceso de beneficio, el cual incluyó el despulpado sin agua (1).

Fermentación alcohólica. Se pesaron muestras de 500 g de pulpa, las cuales se depositaron en bolsas de polipropileno autoclavables y se adicionaron 650 mL de agua de grifo. A la mezcla pulpa-agua se le determinaron las siguientes variables (28): °Brix, Gravedad Específica (GE) y pH; además, se realizó la hidrólisis en aquellos tratamientos que lo requerían y se ajustó al pH cuando se requirió (Figura 1).

La aclimatación de la levadura a la temperatura de fermentación se realizó en 100 mL de agua de grifo. Posteriormente, se adicionó el inóculo a las bolsas con la mezcla pulpa-

agua y se homogeneizó con la ayuda de un agitador manual; luego, se taparon las bolsas y se fermentaron las muestras durante 15 h (Figura 2).

Destilación simple. Al final del proceso de fermentación, la pulpa se prensó a un valor de 25 kN (Figura 3), se midió el volumen de prensado y a éste se le realizaron análisis de pH, Gravedad Específica y °Brix (28), posteriormente el prensado se llevó a un

proceso de destilación simple. Así mismo, al destilado se le determinó el grado alcohólico, con un hidrómetro, el cual proporcionó el valor del contenido de alcohol en % v/v, de acuerdo con el método 957.03 de la AOAC (2).

Con el volumen del destilado y los grados alcohólicos se determinó la cantidad de alcohol obtenido en el proceso de fermentación por cada kilogramo de pulpa fresca antes de fermentar.



Figura 1. Ajuste de pH luego de la hidrólisis.



Figura 2. Incubación de las muestras.

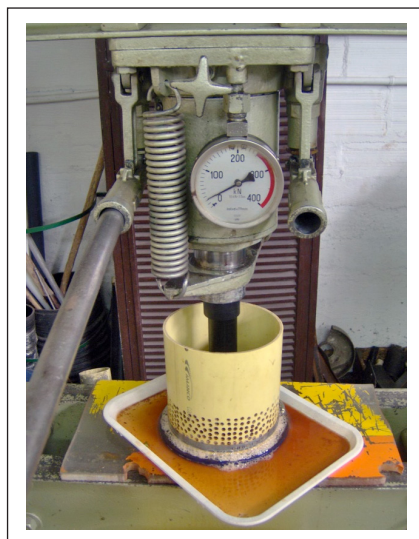


Figura 3. Prensado de la pulpa después de la fermentación.

Rectificación del alcohol. Las muestras provenientes de la destilación simple se unieron por tratamiento y se llevaron a procesos de rectificación, utilizando inicialmente una columna vigreux de 40 mm de diámetro y 50 cm de longitud, y posteriormente se utilizó una columna empacada con anillos *Rashing*.

Deshidratación del alcohol. Los destilados de la rectificación se pasaron por tamices moleculares, con un tamaño de 4A° para obtener el alcohol deshidratado.

Determinación del contenido de etanol. Para la determinación del contenido de etanol en las muestras rectificadas y deshidratadas por densidad se utilizó el método del picnómetro (2). Con los valores de densidad y las tablas donde se relaciona la densidad de soluciones de etanol saturado de aire y agua según la temperatura (16), basadas en Spieweck y Bettin (36), se determinó el contenido de etanol en % p/p.

Para la determinación por cromatografía del contenido de etanol se utilizó un cromatógrafo de gases, Hewlett Packard 6890, equipado con detector de ionización de llama (FID) y una columna capilar AT1701 (30 m longitud, 1,0 µm espesor, 530 µm ID con fase estacionaria de 5% fenil-metil-siloxano).

Para la determinación del contenido de congéneres en las muestras destiladas y deshidratadas de alcohol se utilizó un cromatógrafo de gases con detección de espectrometría de masas, Shimadzu QP2010 plus, y una columna capilar SHRX1-5MS (30 m longitud, 0,25 µm espesor, 0,25 mm ID con fase estacionaria de 5% fenil-metil-siloxano).

Vinazas. Para la caracterización de las vinazas obtenidas en el proceso de destilación se realizaron análisis de pH (método potenciométrico, empleando como sensor un electrodo combinado Ref. InLab 413SG); sólidos totales (método gravimétrico) (3) y demanda química de oxígeno (método de reflujo cerrado, método colorimétrico) (23).

Análisis estadístico. La variable respuesta fue la producción de alcohol y como variables complementarias se determinaron el pH, la gravedad específica y los grados brix. Para

cada tratamiento se estimó el promedio y la desviación estándar. Se aplicó un análisis de varianza al 5%, con la variable de respuesta, bajo el diseño experimental propuesto y se seleccionó la mejor combinación hidrólisis x fermentación, de acuerdo con una prueba de contraste al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones climáticas. Durante el período en el cual se realizó la experimentación, las condiciones climáticas fueron: 21,5°C de temperatura promedio, 79,7% de humedad relativa, 3.156,4 mm de precipitación y 1.435 horas de brillo solar.¹

Beneficio del fruto de café. El promedio del peso obtenido en 10 tandas de café cereza beneficiado (1.500 kg), para la pulpa proveniente del despulpado sin agua, fue del 43,00% del peso del fruto fresco (CV=2,45%), con un promedio de 2,90 °Brix de la mezcla pulpa-agua (CV=9,34%), 1,01 de gravedad específica en promedio (CV= 0,10%) y un valor promedio de pH de 4,60 (CV =3,61). Montilla (25) reporta un valor de pulpa fresca del 43,58%, con respecto al peso del fruto de café.

Proceso de destilación. En la Tabla 1 se presentan los valores promedio de alcohol obtenido en la destilación simple de los prensados de la mezcla pulpa-agua, fermentada, para cada uno de los tratamientos evaluados. Los valores fueron calculados a partir de la determinación del grado alcohólico del destilado.

El análisis de varianza mostró efecto de la interacción hidrólisis-inóculo en los rendimientos de alcohol (variable respuesta), así

¹ JARAMILLO, R., A. Resultados de las variables climáticas durante el 2010 en Cenicafé-Sede La Granja. Septiembre 19 del 2011.

Tabla 1. Promedio del alcohol obtenido por cada 500 g de pulpa de café fermentada.

	Tratamiento	Promedio* (mL de alcohol)	D.E.
1	Fermentación natural	1,84 EFGH	0,26408
2	Levadura prensada 1	8,69 ABCD	1,12956
3	Levadura prensada 2	9,66 ABCD	0,54092
4	Levadura seca 1	9,23 ABCD	1,02455
5	Levadura seca 2	9,04 ABCD	1,59848
6	Hidrólisis ácida + Fermentación natural	0,60 H	0,06577
7	Hidrólisis ácida + Levadura prensada 1	1,44 FGH	0,54816
8	Hidrólisis ácida + Levadura prensada 2	2,25 EFGH	1,11614
9	Hidrólisis ácida + Levadura seca 1	2,87 EFGH	0,79046
10	Hidrólisis ácida + Levadura seca 2	5,63 CDEFG	1,58296
11	Hidrólisis alcalina+ Fermentación natural	0,78 GH	0,09887
12	Hidrólisis alcalina + Levadura prensada 1	5,90 BCDEF	0,75096
13	Hidrólisis alcalina + Levadura prensada 2	6,04 BCDEF	0,55897
14	Hidrólisis alcalina + Levadura seca 1	6,76 ABCDE	0,67450
15	Hidrólisis alcalina + Levadura seca 2	5,11 DEFGH	0,82563
16	Hidrólisis enzimática 1+ Fermentación natural	1,50 FGH	0,29541
17	Hidrólisis enzimática 1+ Levadura prensada 1	10,32 ABC	1,05207
18	Hidrólisis enzimática 1+ Levadura prensada 2	11,48 A	0,59078
19	Hidrólisis enzimática 1+ Levadura seca 1	11,62 A	0,89875
20	Hidrólisis enzimática 1+ Levadura seca 2	10,83 AB	0,68888
21	Hidrólisis enzimática 2+ Fermentación natural	1,27 FGH	0,18354
22	Hidrólisis enzimática 2+ Levadura prensada 1	11,59 A	0,49548
23	Hidrólisis enzimática 2+ Levadura prensada 2	9,81 ABCD	1,87421
24	Hidrólisis enzimática 2+ Levadura seca 1	8,99 ABCD	1,59038
25	Hidrólisis enzimática 2+ Levadura seca 2	11,52 A	0,78372

(*) Valor promedio de seis réplicas. Promedios con la misma letra no presentaron diferencias significativas. D.E: Desviación Estándar.

como en el pH, °Brix (Tabla 2) y la gravedad específica (variables complementarias).

La prueba de constrate al 5% mostró que los tratamientos con mayor rendimiento en la producción de alcohol y entre los cuales no se presentaron diferencias estadísticas, fueron los que involucraron la hidrólisis enzimática con celulasas (Hidrólisis enzimática 1) y levaduras comerciales, con un valor promedio de 22,12 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca, seguido de la hidrólisis enzimática con celulasas-pectinasas (Hidrólisis enzimática 2) y levaduras comerciales, con un promedio

de 20,96 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca, y los tratamientos sin hidrólisis y levaduras comerciales con un valor de 18,30 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca.

Los tratamientos que se sometieron a procesos en autoclave a 121°C, como la hidrólisis ácida y alcalina, alcanzaron valores promedio de 6,09 mL.kg⁻¹ y 11,91 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca, respectivamente, cuando se inocularon con levaduras comerciales. Estos tratamientos fueron estadísticamente diferentes de aquellos sometidos a hidrólisis enzimática y de los tratamientos sin hidrólisis.

Con respecto al valor de pH, al final del proceso de fermentación sólo los tratamientos con hidrólisis alcalina presentaron valores por encima de 5,0, y fueron estadísticamente diferentes de los demás tratamientos. Los tratamientos enzimáticos con los que se alcanzaron los mayores rendimientos de alcohol mostraron valores de pH entre 4,39 y 4,44.

El pH óptimo para las levaduras se encuentra en un rango entre 4,5 y 5,5 (26).

Estudios reportan que el pH más favorable para el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae* se encuentra en el rango entre 4,4 y 5,0, con un pH de 4,5 para su crecimiento óptimo, pero no se desarrolla bien en medio alcalino, a menos que se haya adaptado previamente al mismo (20). El pH del medio tiene una gran influencia en los productos finales obtenidos en el proceso de fermentación anaerobia y tiende a disminuir debido a la producción de ácidos.

Tabla 2. Valores de las variables complementarias.

Tratamiento	pH		°Brix	
	Promedio*	D.E.	Promedio*	D.E.
1 Fermentación natural	4,12 BC	0,05924	3,78 C	0,12494
2 Levadura prensada 1	4,32 B	0,03180	2,35 D	0,06191
3 Levadura prensada 2	4,30 B	0,06112	2,28 D	0,04773
4 Levadura seca 1	4,29 B	0,06157	2,35 D	0,08851
5 Levadura seca 2	4,37 B	0,02301	2,42 D	0,06540
6 Hidrólisis ácida + Fermentación natural	3,90 C	0,03756	3,70 C	0,16125
7 Hidrólisis ácida + Levadura prensada 1	4,16 BC	0,12489	8,42 A	0,16003
8 Hidrólisis ácida + Levadura prensada 2	4,21 BC	0,14813	7,90 A	0,16330
9 Hidrólisis ácida + Levadura seca 1	4,16 BC	0,09562	7,62 A	0,47499
10 Hidrólisis ácida + Levadura seca 2	4,21 BC	0,13539	7,95 A	0,21564
11 Hidrólisis alcalina+ Fermentación natural	4,17 BC	0,06752	4,28 C	0,27618
12 Hidrólisis alcalina + Levadura prensada 1	5,41 A	0,07178	6,22 B	0,24687
13 Hidrólisis alcalina + Levadura prensada 2	5,27 A	0,07265	6,30 B	0,32660
14 Hidrólisis alcalina + Levadura seca 1	5,29 A	0,04695	6,25 B	0,21409
15 Hidrólisis alcalina + Levadura seca 2	5,32 A	0,05076	5,77 B	0,35746
16 Hidrólisis enzimática 1+ Fermentación natural	4,17 BC	0,06956	3,83 C	0,15635
17 Hidrólisis enzimática 1+ Levadura prensada 1	4,44 B	0,02548	2,50 D	0,07746
18 Hidrólisis enzimática 1+ Levadura prensada 2	4,41 B	0,03870	2,65 D	0,11475
19 Hidrólisis enzimática 1+ Levadura seca 1	4,39 B	0,03180	2,60 D	0,08165
20 Hidrólisis enzimática 1+ Levadura seca 2	4,41 B	0,02704	2,67 D	0,06667
21 Hidrólisis enzimática 2+ Fermentación natural	4,14 BC	0,04549	4,02 C	0,13017
22 Hidrólisis enzimática 2+ Levadura prensada 1	4,40 B	0,03810	2,48 D	0,12494
23 Hidrólisis enzimática 2+ Levadura prensada 2	4,39 B	0,02236	2,52 D	0,12494
24 Hidrólisis enzimática 2+ Levadura seca 1	4,41 B	0,02319	2,40 D	0,17321
25 Hidrólisis enzimática 2+ Levadura seca 2	4,40 B	0,02608	2,52 D	0,07923

(*) Valor promedio de seis réplicas. Promedios con la misma letra no presentaron diferencias significativas. D.E: Desviación Estándar.

Hubo diferencias estadísticas en la variable °Brix entre los tratamientos sometidos a hidrólisis ácida y alcalina, siendo diferentes entre sí, y de los tratamientos sin hidrólisis y con hidrólisis enzimática, sin diferencias estadísticas entre estos últimos tipos de hidrólisis, a un nivel de significancia del 5% (Tabla 2). Los °Brix miden el contenido de sólidos solubles presentes en el jugo fermentado de pulpa, en el cual se encuentran azúcares, ácidos, sales y demás compuestos solubles en agua. En este estudio se observó que los tratamientos con mayores contenidos de °Brix en el jugo fermentado fueron los que mostraron menores rendimientos de alcohol y menores valores de pH, siendo los ácidos generados durante el proceso fermentativo los que incrementaron los contenidos de sólidos solubles en el fermentado.

Los menores valores de alcohol obtenidos en los tratamientos sometidos a temperaturas de 121°C se debieron a la caramelización, que a esta temperatura se presenta para algunos azúcares.

Zuluaga (40) reporta un valor de azúcares libres en pulpa de café del 22,65% en peso seco, de los cuales la D-Fructosa en sus 2 anómeros (α y β) representa el 43,8% del total de azúcares libres, seguida de la D-Glucosa en sus 2 anómeros (α : 15,1% y β : 15,1%), la sacarosa (14,1%), la D-Galactosa (10,1%) y el inotisol (1,2%).

La temperatura de caramelización para la D-Fructosa es de 110°C, para la D-Glucosa, D-Galactosa y sacarosa de 160°C. La caramelización o pirólisis de los azúcares se presenta cuando éstos se calientan por encima de su punto de fusión, dando lugar a la aparición de reacciones de enolización, deshidratación y fragmentación, que provocan la formación de derivados furánicos (22).

Los rendimientos de alcohol de los tratamientos con hidrólisis alcalina y ácida e inoculación con levaduras comerciales representaron el 65,08% y el 33,28% de los valores alcanzados en los tratamientos sin hidrólisis inoculados con levaduras comerciales, lo cual se explica porque la fructosa representa cerca del 50% de los azúcares reductores presentes en la pulpa de café y sufre reacciones de caramelización por encima de los 110°C, que generan productos diferentes a los alcoholes.

En promedio, los rendimientos de alcohol para los tratamientos con hidrólisis enzimática y adición de levaduras comerciales fueron de 21,54 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca, superiores en un 17,64% a los valores encontrados para los tratamientos sin hidrólisis y adición de levaduras comerciales.

En todos los tipos de hidrólisis evaluados no hubo diferencias estadísticas en los rendimientos de alcohol obtenidos con las diferentes levaduras comerciales, pero los rendimientos de alcohol sí fueron diferentes estadísticamente de los tratamientos que sólo contenían los microorganismos naturales de la pulpa de café, excepto para los tratamientos sometidos a hidrólisis ácida y alcalina.

Para los tratamientos con fermentación natural no se presentaron diferencias estadísticas en los rendimientos de alcohol entre los diferentes tipos de hidrólisis. Lo anterior se explica por la cantidad y diversidad de levaduras nativas presentes en la pulpa de café, del orden de 3×10^8 UFC/g (5), que representaron una tasa de inoculación cercana a 2,5 mg de levaduras naturales por gramo de pulpa fresca, entre las que se encuentran levaduras como *Saccharomyces* sp., *Torulopsis* sp., *Rhodotorula* sp. y *Candida* sp., con una tasa de inoculación equivalente a la décima parte de la utilizada con levaduras

comerciales prensadas (25 mg de levadura *S. cerevisiae*/g de pulpa fresca).

Rodríguez (29) evaluó la producción de etanol a partir de la fermentación alcohólica de los jugos provenientes del prensado de la pulpa de café fresca y de la fermentación de la mezcla pulpa fresca-agua en relación 1:1, sin hidrólisis, utilizando tres levaduras comerciales, con promedios de los rendimientos de alcohol, medido por hidrometría, de 47,95 mL.L⁻¹ de jugo del primer prensado (contenido de etanol de 98,43%) y de 22,62 mL.L⁻¹ de jugo del segundo prensado (contenido de etanol de 96,60%), equivalentes a un rendimiento de etanol de 12,31 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca. Así mismo, reporta rendimientos de alcohol de 25,73 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca, con fermentación de la mezcla pulpa fresca-agua en relación 1:1 y levaduras comerciales. Con respecto a los menores rendimientos de alcohol registrados en este estudio, 18,30 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca, para los tratamientos sin hidrólisis, equivalentes al 71% de los encontrados por Rodríguez (29), pudieron estar influenciados por la época de cosecha, debido a que en el 2007 la pulpa utilizada para la experimentación provenía del café de la cosecha principal (segundo semestre del año) y para este estudio se trabajó con pulpa proveniente de café de la cosecha de mitaca (primer semestre del año).

Las muestras de alcohol obtenido por tratamiento, después de la deshidratación, se caracterizaron por la técnica de cromatografía de gases para identificar los compuestos presentes en las mismas (Tabla 3).

De acuerdo con los contenidos de etanol determinados por cromatografía (Tabla 3), éstos variaron entre 83,91% correspondiente al tratamiento hidrólisis ácida y fermentación con levadura prensada

1 y 99,97% correspondiente al tratamiento hidrólisis enzimática con celulasas y fermentación con levadura seca 2.

Los mayores promedios de los contenidos de etanol se alcanzaron para los tratamientos con hidrólisis enzimática con celulasas (97,78%), seguido de los tratamientos sin hidrólisis (96,92%), los tratamientos con hidrólisis enzimática utilizando celulasas y pectinasas (95,76%), los tratamientos con hidrólisis alcalina (95,59%) y aquellos tratamientos con hidrólisis ácida (93,97%).

Los análisis cromatográficos mostraron como principales compuestos asociados al etanol, en orden de importancia, dietilacetato del acetaldehído (dietoxietano), propanol, isobutanol, butanol, pentanol, alcohol amílico, alcohol isoamílico, ftalato de dietilo y etilacetato, que en algunos casos alcanzaron valores mayores al 1%.

El propanol, isobutanol, butanol, pentanol, alcohol amílico y alcohol isoamílico, forman parte del denominado aceite de fusel o también llamado alcohol de fusel, por estar formado por alcoholes con más de dos átomos de carbono, su formación durante la fermentación de los azúcares depende del tipo de microorganismo utilizado en la fermentación, la cantidad de nitrógeno presente en el sustrato a fermentar, el pH, la temperatura y el grado de agitación durante la etapa de fermentación. Valores de temperatura por encima del considerado óptimo para el microorganismo utilizado en la fermentación y valores de pH por debajo del óptimo, favorecen la producción de estos congéneres.

El butanol se produce por la fermentación de azúcares por acción de microorganismos como *Clostridium acetobutylicum* y *Escherichia coli*, esta última se ha encontrado de forma

Tabla 3. Análisis cromatográfico del alcohol obtenido a partir de pulpa de café.

Compuesto	Pulpa sin hidrólisis				Pulpa con hidrólisis ácida			
	Tipo de levadura				Tipo de levadura			
	Sc (P1)	Sc (P2)	Sc (S1)	Sc (S2)	Sc (P1)	Sc (P2)	Sc (S1)	Sc (S2)
	mg.L ⁻¹ alcohol anhidro				mg.L ⁻¹ alcohol anhidro			
Etanol	96,3000	96,4800	96,6100	98,3100	83,9100	97,9800	96,4200	97,5700
Propanol	0,5802	0,5615	0,3849	0,2636	0,6807	0,2589	0,4247	0,1988
Isobutanol	1,1264	1,1116	0,5737	0,4728	1,2078	0,3720	0,7838	0,4195
Butanol	0,6556	0,7197	-	0,3533	3,0028	-	-	-
Pentanol	0,3489	0,3522	0,3776	0,1252	2,1153	0,1021	-	0,3152
Alcohol amílico	0,1593	0,1504	0,1020	0,0562	0,4280	-	0,1310	0,1418
Ftalato de dietilo	0,2773	0,0938	0,0600	0,0393	-	0,0295	0,2908	0,1160
Dietilacetel	0,3845	0,3488	1,0529	0,3179	2,0356	0,2761	0,4620	0,2711
EtilAcetato	0,0731	0,0621	0,0147	-	-	0,1319	0,0673	0,1438
2-Metil-3-Buten-2-ol	-	-	0,0498	0,0201	-	-	-	-
Hexanal	-	-	-	-	1,1744	-	-	-
3-Furaldehído	-	-	-	-	1,0006	-	-	-
Dimetilacetel	-	-	-	-	-	0,0405	-	-
Dietoxihexano	-	-	-	-	-	0,0386	0,0180	0,0098
Alcohol isoamílico	-	-	-	-	-	-	0,3200	-
Otros congéneres	0,0947	0,1199	0,7744	0,0416	4,4448	0,7704	1,0824	0,8140

Compuesto	Pulpa con hidrólisis alcalina				Pulpa con hidrólisis enzimática (celulasas)			
	Tipo de levadura				Tipo de levadura			
	Sc (P1)	Sc (P2)	Sc (S1)	Sc (S2)	Sc (P1)	Sc (P2)	Sc (S1)	Sc (S2)
	mg.L ⁻¹ alcohol anhidro				mg.L ⁻¹ alcohol anhidro			
Etanol	97,6400	93,9900	95,2300	95,4900	96,4500	96,8500	97,8300	99,9690
Propanol	0,1091	0,2398	0,3229	0,3571	0,3020	0,5772	0,3302	0,0043
Isobutanol	0,2128	0,6772	0,8715	0,8527	0,4031	0,9007	0,4176	0,0042
Butanol	-	-	1,0293	0,1099	0,4501	0,3024	0,3834	0,0041
Pentanol	-	0,9080	0,9178	0,4499	0,1683	0,6347	0,2129	0,0004
Alcohol amílico	0,0341	0,2000	0,2439	0,2818	0,0493	0,2241	0,0678	0,0002
Nitroetanol	0,0683	0,0990	0,1241	-	-	-	-	-
Ftalato de dietilo	0,0331	0,0545	0,1146	0,0260	0,0907	0,0993	0,0588	0,0016
Dietilacetel	0,4350	2,1076	0,8350	0,4744	1,9459	0,3394	0,6168	0,0150
EtilAcetato	0,0274	0,0413	-	0,0576	0,0963	0,0391	0,0632	0,0011
Alcohol isoamílico	0,1491	-	-	-	-	-	-	-
Otros congéneres	1,2911	1,6826	0,3109	1,9006	0,0443	0,0331	0,0193	0,0001

Continúa...

...continuación

Compuesto	Pulpa con hidrólisis enzimática (celulasas+pectinasas)			
	Tipo de levadura			
	Sc (P1)	Sc (P2)	Sc (S1)	Sc (S2)
	mg.L⁻¹ alcohol anhidro			
Etanol	93,5500	98,7300	92,8400	97,9300
Propanol	0,1689	0,2832	0,9930	0,3960
Isobutanol	0,3208	0,2572	1,2259	0,4817
Butanol	0,0142	0,3297	0,9229	0,4103
Pentanol	0,4339	0,0459	0,2653	0,0749
Alcohol amílico	0,1247	0,0188	0,0885	0,0367
Ftalato de dietilo	0,0226	0,0530	0,2877	0,1633
Dietilacetil	0,0987	0,2404	3,1637	0,4339
EtilAcetato	0,0027	0,0314	0,1164	0,0527
Otros congéneres	5,2635	0,0104	0,0966	0,0205

Nomenclatura. Sc: *Saccharomyces cerevisiae*. P: Levadura comercial prensada. S: Levadura comercial seca.

natural en la pulpa de café (6). El etilacetato se forma por la acción de levaduras diferentes a *Saccharomyces cerevisiae*, que forman parte de los microorganismos presentes naturalmente en la pulpa (*Candida* sp., *Rhodotorula* sp., *Torulopsis* sp.) (6), cuya acción se inhibe cuando la concentración de etanol en el fermentado es mayor al 5% (19).

Los derivados furánicos son compuestos que presentan gran interés en la agricultura, debido a que poseen un conjunto de propiedades bioactivas que posibilitan su uso como fungicidas y bactericidas. Los análisis cromatográficos de los destilados obtenidos permitieron detectar en valores menores al 0,1%: 2,3-Dihidrofurano en el tratamiento 3 (sin hidrólisis); 2-Furancarboxaldehído en el tratamiento 14 (hidrólisis alcalina) y 3-Furaldehído en los tratamientos 14 (hidrólisis alcalina), 16 y 17 (hidrólisis enzimática con celulasas) y con un valor del 1% en el tratamiento 7 (hidrólisis ácida).

La oxidación de alcoholes es uno de los métodos más importantes para la obtención

de carbonilos (cetonas y aldehídos). Los hemiacetales se forman por la reacción de un equivalente de alcohol con el grupo carbonilo de un aldehído o cetona, esta reacción se cataliza con ácido y es equivalente a la formación de hidratos. Los hemiacetales reaccionan con un segundo equivalente de alcohol para formar acetales, los cuales pueden emplearse, por su estabilidad, como grupos protectores del carbonilo.

El ftalato de dietilo es un líquido incoloro e inodoro producido por reacción del anhídrido ftálico con un alcohol apropiado (normalmente alcoholes de entre 6 y 13 carbonos). El anhídrido ftálico se obtiene por la reacción del ácido ftálico con el anhídrido acético, que se forma por la pirolisis del ácido acético, uno de los productos más comunes de los procesos fermentativos.

Valor experimental de producción de alcohol a partir de la pulpa. Se encontró un valor experimental promedio de 18,30 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca, para los tratamientos sin hidrólisis. Si los contenidos de etanol

en la solución alcohólica se mantuvieran en los rangos encontrados por cromatografía, se obtendría un rendimiento de etanol de 17,74 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca. Rodríguez (29), para tratamientos sin hidrólisis, reporta un rendimiento de 25,15 mL.kg⁻¹ de pulpa fresca.

Valor teórico de producción de alcohol a partir de la pulpa de café. Rodríguez (31) reporta un contenido medio de azúcares fermentables, en peso seco, para la pulpa de café fresca del 17,31% (n= 16; CV = 18,11%), así como valores de azúcares totales del 18,49% (n= 16; CV = 16,69%) y un valor de humedad de la pulpa del 77,42% (n= 16; CV = 3,04%).

Al tener en cuenta las relaciones estequiométricas de la fermentación alcohólica de los carbohidratos (1 mol de hexosa genera 2 moles de etanol), a partir de 1 kg de pulpa fresca se podrían obtener 25,2 mL de etanol, si todos los azúcares fermentables se transforman en etanol.

En la Tabla 4 se registran los rendimientos que podrían esperarse si los subproductos generados en el beneficio, por 1 millón de sacos de café verde tipo exportación, se utilizan para la producción de etanol.

Para los cálculos se utilizaron los factores de conversión generados por Montilla (25), para café sin seleccionar, a saber: 6,23 kg de café cereza/kg café verde, 0,4358 kg de pulpa fresca/kg de café cereza y 0,1485 kg de mucílago fresco/kg de café cereza.

Considerando los rendimientos de etanol obtenidos a partir de la pulpa de café en la presente investigación y los reportados por Rodríguez (29), puede concluirse que es posible obtener entre 1.619.388 y 1.938.301 Gal de etanol de la pulpa y el mucílago generados de la producción de 1 millón de sacos de café verde.

Lo anterior es equivalente a obtener entre 1,64 y 1,96 L de etanol a partir de la pulpa y el mucílago provenientes del beneficio de 100 kg de café cereza.

Cabrera *et al.* (8) reportan que “*se pueden obtener entre 2,0 a 2,5 g de etanol en 48 h, cuando la fermentación se realiza a 28°C, a partir de 200 g de cerezas frescas*”, lo que equivaldría a tener entre 1,26 y 1,58 L de etanol/100 kg de café cereza.

Así mismo, Calle (9) reporta que de los subproductos generados en el beneficio de 100 kg de café cereza pueden obtenerse 1,2 L de alcohol etílico de 85°, en promedio, equivalentes a 1,02 L de etanol/100 kg de cereza. De igual manera, Calle (15), después de 210 destilaciones realizadas en 200 kg de café, reportó un rendimiento industrial de 1 L de alcohol de 90° por 12,5 kg de cps, lo cual equivaldría a tener 1,5 L de etanol/100 kg de café cereza.

Vinazas del proceso de destilación del alcohol de pulpa. En la Tabla 5 se presentan los resultados relacionados con la caracterización de las vinazas (volumen, pH, Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Totales)

Tabla 4. Etanol de los subproductos generados en el beneficio por 1 millón de sacos de café verde.

Subproducto	Toneladas generadas	Litros de etanol/tonelada	Galones americanos etanol
Pulpa fresca	162.900	17,74	763.500
Mucílago fresco	55.500	58,37 (29)	855.888
Galones de etanol/millón de sacos de café verde			1.619.388

Tabla 5. Caracterización de las vinazas obtenidas del proceso de destilación del fermentado pulpa - agua en los tratamientos sin hidrólisis y con levaduras comerciales.

Parámetro	Relación Vinaza/vino	pH	ST	DQO (ppm)	DQO/ST
Promedio	0,70	4,57	25925	42826	1,65
D.E.	0,06	0,71	3410	8741	0,22
C.V. (%)	9,27	15,58	13,15	20,41	13,59
Datos	24	24	24	24	24

obtenidas del proceso de destilación simple de las diferentes muestras fermentadas de pulpa-agua, para los tratamientos sin hidrólisis.

Las vinazas provenientes de la destilación simple del fermentado pulpa - agua (relación 1:1,5) representaron el 70% del volumen inicial de la muestra fermentada, con un pH promedio de 4,57, un valor promedio de sólidos totales de 25.925 ppm y un valor promedio de DQO de 42.826 ppm.

Rodríguez (29), reporta que las vinazas provenientes de la destilación simple del fermentado pulpa - agua relación (1:1) representaron el 50% del volumen inicial de la muestra fermentada, con un pH promedio de 4,41, un valor promedio de sólidos totales de 69.886 ppm y un valor promedio de DQO de 129.615 ppm.

La presente investigación permite concluir que con la hidrólisis enzimática de la pulpa de café, previa a la fermentación alcohólica, se alcanzan los mayores rendimientos en la producción de bioetanol. En el análisis de varianza se encontró que la variable “tipo de hidrólisis” tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente “rendimiento de alcohol”, empleando celulasas y pectinasas, respecto a las demás hidrólisis. Para el tipo de levaduras empleadas no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los rendimientos de alcohol.

De igual manera, puede concluirse que puede obtenerse 1 L de etanol a partir de

56 kg de pulpa fresca, generándose 62 L de vinazas, las cuales deben tratarse por digestión anaerobia, con el fin de disminuir el impacto ambiental que éstas ocasionarían sobre los recursos naturales, generándose en el proceso otro biocombustible aprovechable como es el biogás.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a la doctora Esther Cecilia Montoya de la Disciplina de Biometría de Cenicafé, por la asesoría estadística, a la practicante de Ingeniería Agroindustrial Paula Andrea Jaramillo Jiménez por su apoyo en la ejecución de la investigación, al técnico Uriel López y al auxiliar Samuel Castañeda, de la Disciplina de Calidad y Manejo Ambiental por el apoyo logístico. Así mismo, agradece a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia por el apoyo económico para la realización de la investigación QIN0806 “Producción de alcohol carburante a partir de subproductos del café”.

LITERATURA CITADA

1. ÁLVAREZ G., J. Desulpado de café sin agua. Chinchiná : Cenicafé, 1991. 6 p. (Avances Técnicos No. 164).
2. AOAC INTERNATIONAL. Official methods of analysis. 16a. ed. Gaithersburg : AOAC, 1997. 2 vols.
3. APHA; AWWA; WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid : Ediciones Díaz de Santos, 1992. 1914 p.

4. ARCILA O., F. Producción de biogás a base de pulpa de café. Chinchiná : Cenicafé, 1979. 17 p.
5. BLANDÓN C., G.; DÁVILA A., M.T.; RODRÍGUEZ V., N. Caracterización microbiológica y fisico-química de la pulpa de café sola y con mucilago, en proceso de lombricompostaje. *Cenicafé* 50(1):5-23. 1999.
6. BLANDÓN, G.; RODRÍGUEZ, N.; DÁVILA, M.T. Caracterización microbiológica y fisico-química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje. *Cenicafé* 49(3):169-185. 1998.
7. BUITRAGO A., J.; CALLE V., H.; GALLO C., J.T.; CORSO M., M.A. Evaluación de la melaza de café en dietas para cerdos en crecimiento y acabado. *ICA* 5(4):407-410. 1970.
8. CABRERA, S. DE; CALZADA, J.F.; GIL, L.A.; ARRIOLA, M.C. DE. Etanol de cerezas y mucilago de café. p. 129-137. En: SIMPOSIO Internacional sobre la utilización integral de los subproductos del café. (3 : Febrero 16-18 1987 : Guatemala). Guatemala : ICAITI : ANECAFE : PNUMA, 1987.
9. CALLE V., H. Subproductos del café. Chinchiná : Cenicafé, 1977. 84 p. (Boletín Técnico No. 6).
10. CALLE V., H. Cómo producir gas combustible con pulpa de café. Chinchiná : Cenicafé, 1974. 11 p. (Boletín Técnico No. 3).
11. CALLE V., H. Baterías eléctricas con pulpa y mucilago de café. Chinchiná : Cenicafé, 1973. 4 p. (Avances Técnicos No. 25).
12. CALLE V., H. Métodos de extracción de las pectinas del café. *Cenicafé* 13(2):69-74. 1962.
13. CALLE V., H. Perspectivas para el empleo de la pulpa y ripios del café como materiales curtientes. *Cenicafé* 6(62):69-71. 1955.
14. CALLE V., H. Producción de alcohol con los desperdicios del café. *Cenicafé* 2(22):33-34. 1951.
15. CALLE V., H. Ensayo sobre cultivo de levaduras alimenticias en pulpa de café. *Cenicafé* 2(14):33-36. 1951.
16. CESMEC. Tablas de densidad de soluciones etanol-agua. [en línea]. Santiago de Chile : CESMEC, {s.f.}. Disponible en internet: http://www.cesmec.cl/medios/Metrologia/concentracion_densidad_etanol.xls. Consultado en Octubre de 2007.
17. DÁVILA, M.T.; RAMÍREZ, C.A. Lombricultura en pulpa de café. Chinchiná : Cenicafé, 1996. 11 p. (Avances Técnicos No. 225).
18. EL R., A.H.; EL A., M.S.; EL D., A.I.; SALLAM, L.A.; ALLAM, R. Some physiological parameters for ethanol production from beet molasses by *Saccharomyces cerevisiae* Y-7. *Bioresource technology* 42(3):183-189. 1992.
19. ESTELA E., W.; RYCHTERA, M.; MELZUCH, K.; HATTA S., B.; LUDEÑA C., Z.; SARMIENTO C., V.; CHAQUILLA Q., G. Actividad fermentativa de *Saccharomyces ludwigii* y evaluación de la síntesis de compuestos de importancia sensorial durante la fermentación de jugo de manzana. *TIP* 14(1):12-23. 2011.
20. FAJARDO C., E.; SARMIENTO F., S. Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de *Saccharomyces cerevisiae*. Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ciencias básicas, 2007. 120 p. Tesis: Microbiólogo industrial.
21. FNC; CENICAFÉ. Anuario meteorológico cafetero 2007. Chinchiná : Cenicafé, 2009. 568 p.
22. GIL H., A. Tratado de nutrición: Composición y calidad nutritiva de los alimentos. 2a. Ed. Madrid : Editorial médica Panamericana, 2010. 786 p.
23. HACH COMPANY. DR/2000 Spectrophotometer: Procedures manual. Loveland : HACH, 1988. 394 p.
24. LÓPEZ A., M.; CALLE V., H. Valor comparativo de la pulpa de café descompuesta como abono. *Cenicafé* 7(81):285-297. 1956.
25. 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: Ingeniería agrónoma.
26. OSPINA M., A.; PALACIOS G., M. Efecto del cultivo de levaduras sobre la carga orgánica de los efluentes de Sucromiles S.A. Cali : Universidad del Valle, 1994. 172 p.
27. PORRES, C.; CALZADA, J.F.; ROLZ, C. Combustión de la pulpa de café. p. 16-19. En: SIMPOSIO Internacional sobre la utilización integral de los subproductos del café. (3 : Febrero 16-18 1987 : Guatemala). Guatemala : ICAITI : ANECAFE : PNUMA, 1987.

28. RÍOS A., S. Manual de análisis químico del mucílago del café: Disciplina de química industrial. Chinchiná : Cenicafé, 1995. 56 p.
29. RODRÍGUEZ V., N. Balance energético en la producción de etanol a partir de la pulpa y el mucílago de café y poder calorífico de los subproductos del proceso del cultivo de café. Chinchiná : Cenicafé, 2007. 7 p.
30. RODRÍGUEZ V., N. Ensilaje de pulpa de café. Chinchiná : Cenicafé, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 313).
31. RODRÍGUEZ V., N. Avances del experimento QIN-08-02: Obtención de pectinas a partir de la pulpa y el mucílago del café. En: Informe anual de actividades 1998-1999. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 90 p.
32. RODRÍGUEZ V., N.; JARAMILLO L., C. Cultivo de hongos medicinales sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. Chinchiná : Cenicafé, 2005a. 72 p. (Boletín Técnico No. 28).
33. RODRÍGUEZ V., N.; JARAMILLO L., C. Cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* en residuos agrícolas de la zona cafetera. Chinchiná : Cenicafé, 2005b. 56 p. (Boletín Técnico No. 27).
34. RODRÍGUEZ V., N.; ZULUAGA V., J. Cultivo de *Pleurotus pulmonarius* en pulpa de café. Cenicafé 45(3):81-92. 1994.
35. RODRÍGUEZ V., N.; ZAMBRANO F., D.A. Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Chinchiná : Cenicafé, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 393).
36. SPIEWECK, F.; BETTIN, H. Review: Solid and liquid density determination. *Technisches messen* 59:285-292. 1992.
37. VALDÉS D., B.E. Productos de la fermentación de plátano maduro; etanol y una bebida alcohólica: informe final del experimento. Chinchiná : Cenicafé, 2001. 95 p.
38. VALENCIA A., G.; CALLE V., H. La miel de café y su composición. *Cenicafé* 19(4):135-139. 1968.
39. YU, Z.; ZHANG, H. Ethanol fermentation of acid-hydrolyzed cellulosic pyrolysate with *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource technology* 93(2):199-204. 2004.
40. ZULUAGAV., J. Utilización integral de los subproductos del café. p. 63-76. En: ROUSSOS, S.; LICONA, R.; GUTIÉRREZ, M. Seminario internacional sobre biotecnología en la agroindustria cafetalera. Veracruz [México] : {s.l.}, 1989.

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.**
Mariana Santos Rivera, Medica Veterinaria Zootecnista
Gustavo Echeverri M

Gestión de Recursos Naturales y Conservación

Nelson Rodríguez V., Ing. Químico 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.
Laura Vanessa Quintero Yepes, Ing. Química **
Sergio Gómez Rios, Aprendiz Universitario
Daniela Guzmán Cortés, Aprendiz Sena

Fisiología vegetal

Claudia Patricia Flórez R., Ing. Agrónomo Ph.D.
Aristóteles Ortiz, Químico, M.Sc
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.
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.
Rocío del Pilar Pineda Sandoval, Ing. de Alimentos

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 Ph.D.
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

José Ricardo Acuña Z., 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 **
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

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.
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.
Paola Andrea Espejo G. Antropóloga **
Mario López L.
Juan Sebastián Ospina Ramírez, Aprendiz Sena

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 Líbano

Jorge Camilo Torres N., Ing. Agrónomo

Estación Experimental Paraguaito

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
Sebastián Sánchez Agudelo, 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.
Adrián Castro Duque, Aprendiz

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.
Alexander Erazo S. Técnico Electricista
Cristian Andrés Chica Gómez, 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 Alzate 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**

Oscar Eduardo Morales V., Aprendiz

Yuliana Paola Zambrano C., 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 diagrame
- 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 $m^3 s^{-1}$, 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. Está 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
- Permítale 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

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Revisión de textos y corrección de estilo: Sandra Milena Marín López Ing. Agr. MSc.

Diseño y diagramación: Óscar Jaime Loaiza E.

Fotografías: Archivo Cenicafé

Impresión:

1.200 ejemplares



Cenicafé

Al servicio de los caficultores colombianos, desde 1938

www.cenicafe.org