

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ELEMENTOS MINERALES EN CAFÉ VERDE Y TOSTADO, CON RELACIÓN A SUELOS Y ALTITUD

Gloria Inés Puerta Quintero*; Claudia Patricia Bolívar Forero**; Claudia Patricia Gallego Agudelo**

PUERTA Q., G. I.; BOLÍVAR F., C.P.; GALLEGO A., C.P. Composición química de elementos minerales en café verde y tostado, con relación a suelos y altitud. Revista Cenicafé 68(2):28-60. 2017

Se midieron las concentraciones de 44 elementos químicos en café verde y tostado de 162 fincas ubicadas a altitudes de 1.050 a 2.050 m y 15 unidades de suelos en siete departamentos, por la espectrometría de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) y la digestión Kjeldahl. En las fincas se registró la trazabilidad y se hizo el beneficio. Hubo diferencias significativas según el rango de altitud: a mayores altitudes se encontraron mayores concentraciones en el café de As, Bi, Cr, In, Mg, Ni, P, Pd, Pt, Sb, Se, Te y Zn; por el contrario, fueron menores los contenidos de Ba, Ca, Cu, K, Li, Mo, Rb, Sc, Sr. También hubo diferencias por unidades de suelos en los minerales del café: granos de la unidad Malabar no presentaron Pd, pero sí altos contenidos de Fe; de las unidades Quindío y Montenegro mayor concentración de Ba, Ca y Sr; de unidad Siberia en Huila mayor contenido de P, y del Cesar con materiales ígneos-volcánicos menor P, y mayor Rb, Mo y Au. El café tostado presentó similares concentraciones de elementos minerales que el verde. Las diferencias halladas en los contenidos de elementos químicos minerales en el café de Colombia podrían utilizarse como variables químicas de diferenciación del grano de café para su comercialización destacando otros atributos del café de las regiones.

Palabras clave: Calidad, espectrometría de emisión óptica con plasma ICP-OES, trazabilidad, beneficio húmedo, cenizas, inocuidad, metales pesados.

CHEMICAL COMPOSITION OF MINERAL ELEMENTS IN GREEN AND ROASTED COFFEE WITH RESPECT TO SOIL AND ALTITUDE

The concentrations of 44 chemical elements in green and roasted coffee of 162 farms at altitudes between 1,050 and 2,050 m and 15 units of soils in 7 departments were measured by optical emission spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-OES) and Kjeldahl digestion. Traceability was recorded and the coffee process was made in the farms. There were significant differences according to altitude range: The higher the altitudes, the higher the concentrations in coffee of As, Bi, Cr, In, Mg, Ni, P, Pd, Pt, Sb, Te and Zn; on the other hand, there were less contents of Ba, Ca, Cu, K, Li, Mo, Rb, Sc, and Sr. Also, there were differences among soil units regarding minerals of coffee: The grains of the Malabar unit did not have Pd, but it had high contents of Fe; Quindío and Montenegro units had greater concentration of Ba, Ca, and Sr; Siberia unit in Huila had greater content of P, and Cesar unit with igneous-volcanic materials had low P and high Rb, Mo and Au. Roasted and green coffee showed similar concentrations of mineral elements. The differences found in the contents of mineral chemical elements in Colombian coffee could be used as chemical variables to differentiate the coffee bean for its market by highlighting other attributes of coffee regions.

Keywords: Quality, optical emission spectrometry with plasma ICP-OES, traceability, wet process, ashes, safety, heavy metals.

* Investigador Científico III y ** Asistentes de Investigación, respectivamente, Disciplina de Calidad. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El café de Colombia se ha destacado comercialmente por su buena calidad y suavidad (36) y se cultiva en fincas de 22 departamentos, a altitudes entre 1.000 m y 2.000 m, y en suelos de materiales parentales como cenizas volcánicas, rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (12, 43).

La composición química del grano de café verde está conformada en promedio por 10% a 12% de agua, 83% a 86% de materia orgánica y 4% a 5% de cenizas. Los sabores y aromas del café tostado están formados de sustancias orgánicas. Las cenizas que contienen los elementos químicos minerales no aportan al sabor del café (34).

Varios autores han buscado diferenciar especies y procedencias del café midiendo los contenidos de sustancias orgánicas con métodos cromatográficos y espectrofotométricos (9, 10, 14, 48), sin embargo, no se ha logrado una diferenciación inequívoca porque los compuestos orgánicos como los aminoácidos, lípidos, azúcares y volátiles del café se modifican a través del procesamiento y almacenamiento del producto (34), debido a fenómenos térmicos y bioquímicos, por la acción de las enzimas y debido a las variaciones en las condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura y los gases (15, 21, 34, 37).

En la mayoría de los estudios sobre la composición química de los elementos minerales del café se han usado muestras comerciales, en las cuales se identificó el país o la especie, pero no su trazabilidad de procesos. Roffi *et al.* (42) y Ferreira *et al.* (13) evaluaron la calidad del café de Angola y determinaron por absorción atómica el contenido de 16 elementos químicos en el grano de café verde y tostado, pero no encontraron relación entre la calidad de la bebida con el contenido de elementos químicos,

ni diferencias por procedencia. Macrae *et al.* (22) sugirieron que el Mn podría estar relacionado con la calidad del café.

Santos y Oliveira (45) usaron la espectroscopia con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) para medir Cr en café soluble de Brasil, encontrando altos niveles de este elemento tóxico, los cuales se asociaron a procesos industriales y de cultivo. Pertoldi *et al.* (29) buscaron diferencias en bebida y espresso entre las especies, usando absorción atómica y columna de grafito (GFAAS), y reportaron mayores contenidos de Mn y Zn en Arábica que en Robusta. Martin *et al.* (24), mediante ICP-OES, afirmaron que el P, Mn y Cu permitirían detectar café Robusta en mezclas comerciales con café Arábica en estado tostado.

Quijano y Spetel (40) usaron espectrometría de rayos gama de alta resolución para medir elementos minerales en café verde *Coffea arabica*, *C. canephora*, *C. liberica* y *C. congensis* de la Colección Colombiana de Café de Cenicafé en Colombia y no reportaron diferencias entre especies. Clarke y Walker (7) no encontraron diferencias en los contenidos de K en el café verde y soluble de Colombia, Brasil, Uganda y Angola. Puerta (4, 5) detectó 1,88% de N y 1,34% de K, y afirmó que éstos eran los elementos más abundantes en café verde y tostado de las variedades Arábica procedentes de Chinchiná (Caldas) y la Sierra Nevada de Santa Marta (Magdalena), en Colombia.

Prodolliet *et al.* (32) determinaron 57 elementos químicos en muestras comerciales de café de Costa Rica, Brasil, Colombia, Ecuador, Etiopía, Guatemala, Hawaii (Estados Unidos), Indonesia, Kenia, México, San Salvador y Tailandia, y concluyeron que “el perfil mineral del café no fue lo suficientemente discriminante para permitir una identificación

no ambigua de un café verde de origen geográfico desconocido”.

Anderson y Smith (2) midieron por ICP-OES 18 elementos químicos, en 160 muestras de café tostado de supermercados de Estados Unidos, provenientes de Costa Rica, Colombia, Guatemala, Panamá, Etiopía, Kenia, Indonesia y Sumatra, y dedujeron que se podría “separar el café por orígenes geográficos” por el contenido de varios elementos y también indicaron que los granos de Colombia presentaron los niveles más altos de Zn y los granos de Sumatra presentaron los niveles más bajos de Zn, Mn, K y Na, y los niveles más altos de Fe y Al. Por otro lado, los contenidos de P, Zn, Mg, Ca, K y S variaron muy poco entre los orígenes.

Villareal *et al.* (48) no encontraron diferencias por los contenidos de elementos químicos entre genotipos, ni entre tres localidades. Sadeghian *et al.* (44) indicaron que el N, P, Mg, S y Mn, medidos por absorción atómica, estaban en mayor concentración en café almendra, el K, Cu y B en la pulpa, y el Ca, Fe y Zn en el mucílago.

En otros productos agrícolas, Esehie (11) no logró diferenciar hierbas de Australia por procedencia, según el contenido de fibra, proteína, cenizas, extracto etéreo o P, K, Ca, Mg, Na, Cu, B, Zn, Mn y Fe, que fueron medidos por absorción atómica. Álvarez *et al.* (1) usaron ICP-OES para medir 12 elementos en vinos y conocer el aporte de estos elementos a la dieta. Day *et al.* (9) midieron por absorción atómica y por ICP-OES los contenidos de K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn, Cu, Ba, Rb, Al y Sr en uvas de Francia, y afirmaron que por análisis de la composición isotópica y los elementos podría determinarse el origen geográfico del vino, aunque indicaron que las variedades

afectaban en mayor grado la composición química del vino.

Krejcová y Cernohorsky (19) dedujeron que el B en el café y el té puede determinarse por ICP-OES. Malik *et al.* (23) reportaron que no hubo diferencias entre el café Arábica y Robusta por el contenido de sus elementos y que el café presentó mayores contenidos de Ca y Fe que el té.

La presente investigación se fundamentó en la estabilidad química de 44 elementos químicos minerales y las cenizas durante el almacenamiento del café, y buscó aportar al conocimiento de la química mineral del grano de café de siete departamentos de Colombia, según las unidades de suelo y el rango de la altitud.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de las fincas. Las fincas y lotes de café se escogieron entre Cenicafé y el Servicio de Extensión en el año 2005, teniendo en cuenta los registros del Sistema de Información Cafetera SICA, la información climática de los municipios, altitudes y unidades de suelos en los respectivos departamentos; además, las fincas del muestreo cumplieron con los siguientes requisitos para participar en la investigación:

1. Fincas en municipios y departamentos de producción de café en Colombia, donde se identificaran por parte del Servicio de Extensión de la zona, el desarrollo de las buenas prácticas agronómicas.
2. Fincas representativas del departamento que se hubieran destacado por su calidad, según criterios y registros del servicio de extensión de la zona.
3. Cultivos de segundo y tercer años de producción.

4. Cultivos que no se renovarían por siembra o zoqueo en los dos años siguientes al inicio del muestreo.

5. Lotes de café dentro de los rangos de altitud en estudio (menor a 1.300 m, entre 1.300 y 1.600 y por encima de 1.600 m), con información conocida sobre la unidad de suelo y el tipo de variedad cultivada.

6. Disponibilidad de la finca para: marcación del lote, visita del Extensionista para la toma de las muestras de café durante al menos 2 años de cosechas.

Procedencia de las muestras. Las muestras de café se obtuvieron de cultivos de café localizados en 216 lotes, 162 fincas ubicadas entre 1.050 y 2.050 m de altitud, en 15 unidades de suelos, 112 veredas, 35 municipios, 7 departamentos cafeteros (Antioquia, Caldas, Cesar, Huila, Quindío, Tolima y Santander). Además, se incluyeron varios lotes de las Estaciones Experimentales de Cenicafé Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar), San Antonio (Floridablanca, Santander), Paraguaicito (Buenavista, Quindío) y Naranjal (Chinchiná, Caldas) (Tablas 1 y 2).

Registros de trazabilidad. En Cenicafé se preparó un formato para la trazabilidad del café de las fincas con base en el Avance Técnico No. 355 (38), que se compartió con cada Extensionista en los departamentos, en el cual se registraron las variables de origen y de procesamiento del beneficio, secado y almacenamiento del café. Las muestras se codificaron con un código único.

Trabajo en el campo. Se planificó y coordinó el cronograma de trabajo para la toma de muestras durante las cosechas en cada departamento. Para el segundo semestre del año 2005 se recolectaron muestras en los departamentos de Antioquia, Quindío, Caldas, Cesar y Santander. En el primer semestre

del 2006 se realizó el primer muestreo en Tolima y Huila y el segundo muestreo de Antioquia, Quindío, Caldas, Cesar y Santander. En el 2007 se completaron los muestreos de Tolima y Huila.

Tabla 1. Localización de las fincas participantes en el muestreo para la medición de la composición mineral del café verde y tostado, proyecto QIN3010.

Departamento	Municipio	Vereda
Antioquia	Andes	Alto del Rayo
		Bajo Cañaveral
		Cascajero
		El Chispero
		La Pava
		Momblan
		Palestina
		San Gregorio
		Sorrento
		Yarumal
	Betania	Cajones
		El Tirado
		La Italia
	Concordia	Las Ánimas
		Pueblo Rico
Santa Rita		
Yarumal		
Zona Urbana		
Fredonia	La Loma	
	La Toscana	
Giraldo	Murrayal	
Pueblo Rico	La Sierrita	
	Castalia	
Santa Bárbara	Patudal	
	El Guayabo	
	Las Mercedes	
	Los Naranjos	
Cesar	La Paz	Morro Plancho
		Filo Machete
	Pueblo Bello	La Laguna
		Cabecera Municipal
		Costa Rica
		Continúa...

...continuación.

Departamento	Municipio	Vereda	Departamento	Municipio	Vereda
Cesar	Pueblo Bello	La Carolina	Quindío	Calarcá	Barcelona
		Montes Grandes			La Española
	Acevedo	El Mesón		La Paloma	
		La Marimba		La Julia	
		La Palma		La Pola	
		San Isidro		Villarazo	
	Aipe	La Esmeralda		El Paraíso	
		La Primavera		El Placer	
	Campo Alegre	San Miguel		El Vigilante	
	Hobo	El Batán		Calle Larga	
Estoracal		Pueblo Tapao			
Huila	Iquirá	El Recreo	Quimbaya	El Jazmín	
		Ibirco	Ibagué	El Cural	
		Juancho		Perico	
		San Francisco	Líbano	Aguador	
	Villa María	Naranjo			
	El Triunfo	Campo Alegre			
	Pradera	El Delirio			
	Palermo	El Mirador	Tolima	La Trinidad	
	Guadualito	Meseta Baja			
	Pitalito	Alto Naranjo		Meseta Baja (Alta)	
Betania		Pantaniello			
Rivera	Los Laureles	Rovira	Buenos Aires		
	Buena Vista		Calabazos		
	Honda Alta		La Luisa		
	Loma Larga		La Palmita		
Santa María	El Encanto	Caldas	Los Andes		
	San Joaquín		Pijao		
Teruel	Santa Helena		Chinchiná	Paz Baja	
	Arrayanes			Altamira	
	La Floresta		Manizales	Naranjal	
	La María			El Rosario	
Santander	Floridablanca		Vericute	Palestina	Cartagena
			El Caimo		La Esperanza
Quindío	Armenia		El Rhin	Risaralda	Santana
			La Patria		Sarcirí
		La Revancha	Buena Vista	Surrumbi	
		Marmato		Río Verde Bajo	
		Mesopotamia			

Tabla 2. Rangos de altitud, unidades de suelo y materiales parentales de los sitios de muestreo, en cada departamento.

Rango de altitud	Unidad de suelo	Material parental	Departamento
Menor a 1.300 m	Chinchiná	Ceniza volcánica	Antioquia
	Parnaso-200	Ígneo extrusivo	
	Salgar	Metamórfico	
	Suroeste	Sedimentario	
	Chinchiná	Ceniza volcánica	Caldas
	La Montaña	Ígneo - volcánica	Cesar
	Malabar	Ceniza volcánica	Quindío
	Montenegro	Ceniza volcánica	
Quindío	Ceniza volcánica	Tolima	
Libano	Ceniza volcánica		
San Simón	Ígneo intrusivo		
Entre 1.300 y 1.600 m	Chinchiná	Ceniza volcánica	Antioquia
	Parnaso-200	Ígneo extrusivo	
	Suroeste	Sedimentario	
	Chinchiná	Ceniza volcánica	
	La Montaña	Ígneo - volcánica	Cesar
	Perijá	Sedimentario	Huila
	Campo Alegre	Ígneo intrusivo	
	La Espiga	Ígneo intrusivo	
	San Simón	Ígneo intrusivo	
	Siberia	Ígneo extrusivo	Quindío
	Montenegro	Ceniza volcánica	
	Quindío	Ceniza volcánica	Santander
	Paujil	Metamórfico	
	Libano	Ceniza volcánica	
San Simón	Ígneo intrusivo		
Mayor a 1.600 m	Parnaso-200	Ígneo extrusivo	Antioquia
	Salgar	Metamórfico	
	Suroeste	Sedimentario	
	Chinchiná	Ceniza volcánica	Caldas
	Perijá	Sedimentario	Cesar
	Campo Alegre	Ígneo intrusivo	Huila
	La Espiga	Ígneo intrusivo	
	San Simón	Ígneo intrusivo	
	Siberia	Ígneo extrusivo	
	San Simón	Ígneo intrusivo	Tolima

Prácticas de beneficio. Se tomaron dos tipos de muestras: Café proceso finca, correspondiente al café pergamino que se había producido en

la finca en días recientes al muestreo, del cual se registró su trazabilidad y la muestra se tomó del sitio de almacenamiento en la

finca; y café BPM, cosechado del mismo lote de la respectiva finca y procesado mediante fermentación y secado al sol, por intervención del Extensionista siguiendo los avances de buenas prácticas y trazabilidad de Cenicafé (33, 38) y el protocolo enviado por la disciplina de Calidad y usando los equipos y agua del beneficiadero de la finca.

Beneficio de las muestras de café BPM. Se tomaron 40 kg de frutos maduros de café cosechados de forma manual y selectiva, se beneficiaron según las Buenas Prácticas Agrícolas, con clasificación de la cereza en canecas con agua, fermentación sin agua por 16 h y secado al sol, en las instalaciones y superficies disponibles en la finca (33). El café se lavó siguiendo el método desarrollado por Zambrano (50). Todas las muestras secas se empacaron en bolsas plásticas transparentes, se etiquetaron con el nombre de la finca, lote, variedad, fecha, departamento, municipio y tipo de práctica de beneficio y se enviaron a Cenicafé. Se produjeron de 4 a 6 kg de café pergamino seco por año y sitio de muestreo. Se tomó 1 kg de café trillado para el análisis de los elementos químicos.

Análisis de laboratorio. Se analizaron 621 muestras de café verde y 621 de café tostado. Cada muestra de café pergamino se trilló, se tomaron todos los granos de tamaño superior a 15/64 de pulgada (*Seedburo company*, USA). La tostación del café se efectuó en grado medio, iniciando a 210°C, en una tostadora Probat de tambor de laboratorio. Cada muestra de café almendra o tostado se homogeneizó y se molió en grado 700 μm (serie Tyler, A.S.T.M., USA), se secó a 105°C en estufa hasta peso constante (ISO6673), luego se incineró en horno mufla (*thermolyne furnace* 30400) a 475°C por 4 h, y posteriormente, se diluyó con ácido HCl 1:1. La cuantificación del contenido de los elementos químicos se realizó por

triplicado con un espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), sistema simultáneo y axial de la marca Varian, referencia Vista-MPX CCD.

Previamente, en el laboratorio se estandarizaron las condiciones de análisis que incluyeron: Determinación de la cantidad de muestra de análisis que permitiera la detección de cada elemento, las concentraciones y combinaciones de los estándares para el análisis multi-elemental, de tal forma que se evitaran las interferencias espectrales, las condiciones de incineración y acidificación de las muestras, y las longitudes de onda para cada elemento. Los coeficientes de correlación de las curvas de calibración para todos los elementos químicos fueron superiores a 0,995. Además, para los elementos As, Se, Sb, Te, Bi y Sn se generó el respectivo hidruro antes de su cuantificación. El N total se midió por digestión Kjeldahl.

Variables. Las mediciones se expresan por peso de materia seca en las siguientes unidades: Porcentaje (%) para cenizas, N y K; g.kg^{-1} para S, Mg, P, Ca; mg.kg^{-1} (ppm) para Na, Rb, Fe, Mn, Si, Sr, Cu, Al, B, Ba, Zn, Li, In; ppb ($\mu\text{g.kg}^{-1}$) para Ni, Sn, Ti, Co, Pt, Cr, Tl, Mo, Pb, Ge, La, Te, Ce, Ga, Au, As, V, Ag, Se, Sb, Cd, Bi, Pd, Sc, Be.

Análisis estadísticos. Se estimaron los valores mínimo, máximo, media, mediana, error medio y coeficientes de variación de las concentraciones de los elementos en los granos de café, se efectuó el análisis de varianza ANOVA (Duncan 5%) y se analizaron correlaciones de *Pearson* al nivel del 5%, entre las variables químicas y con los factores de origen por departamentos, variedades, rangos de altitud, material parental y unidades de suelo y de proceso, prácticas de beneficio, tipos de beneficio, tipos de secado y procedencia del agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de las fincas. Las fincas evaluadas tenían áreas de 0,6 a 507 ha, con un promedio de 38 ha; el mayor valor se registró en Cesar. El 57% de las fincas tenían áreas superiores a 5,1 ha en café, y el 32% tenían cafetales con sombrío. En cuanto a infestación por broca, se registraron promedios de 1,5% en los lotes y 2,5% en las fincas, y en el 46% de los lotes se usaron insecticidas. El 24,5% de las fincas se ubicaron por debajo de los 1.300 m; 44,4% entre 1.300 y 1.600 m y 31,1% por encima de 1.600 m. El 98,6% de los lotes se fertilizó con abonos químicos. Las variedades cultivadas fueron Caturra, Colombia, Maragogipe, Tabi, Borbón y algunos Catimor en Antioquia. La edad promedio de los lotes fue de 3,5 años.

En el 70% de las fincas se realizó fermentación con agua, en el 46,3% realizaban

mezclas de café despulpados hasta de 5 días. El combustible más usado para el secado del café en las fincas fue el carbón mineral, seguido por el aceite combustible para motores, ACPM. El 20% de los secadores al sol eran heldas, paseras y carros secadores con superficie de madera, otros tenían marquesinas y patios en cemento.

Cenizas. Variaron de 3,34% a 5,79% en el café verde, con un valor promedio de 4,12%, y en general, los valores de las concentraciones de las cenizas en el tostado fueron 10% mayores que en el grano verde, y variaron de 3,32% a 7,33%, con un promedio de 4,61%. En la tostación del café se pierde agua y materia orgánica, lo que explica en parte los cambios en las concentraciones de los elementos con respecto al verde. Se presentaron diferencias estadísticas en el contenido total de las cenizas, según los rangos de altitud, unidades de suelos y materiales parentales (Tablas 3, 4 y 5).

Tabla 3. Contenido de cenizas del grano de café verde y tostado, para cada rango de altitud.

Rango de Altitud (m)	Promedio de cenizas café verde %	Dif*	Promedio de cenizas café tostado %	Dif*
<1.300	4,21	A	4,69	A
1.300 a 1.600	4,12	B	4,63	A
>1.600	4,05	C	4,52	B

*Letras diferentes (Dif) para cada elemento indican diferencias entre rangos de altitud, Duncan (5%).

Tabla 4. Contenido de cenizas del grano de café verde y tostado, para cada material parental.

Material parental	Promedio de cenizas café verde %	Dif*	Material parental	Promedio de cenizas café tostado %	Dif*
Ígneo - volcánica	4,32	A	Ígneo - volcánica	4,71	A
Metamórfico	4,27	A	Ígneo intrusivo	4,69	A
Sedimentario	4,20	B	Sedimentario	4,67	A
Ceniza volcánica	4,13	C	Metamórfico	4,62	A
Ígneo intrusivo	4,09	D	Ceniza volcánica	4,62	A
Ígneo extrusivo	3,98	E	Ígneo extrusivo	4,30	B

*Letras diferentes (Dif) para cada elemento indican diferencias entre rangos de altitud, Duncan (5%).

Tabla 5. Contenido de cenizas del grano de café verde y tostado, para cada unidad de suelo.

Unidad de suelo	Promedio de cenizas café verde %	Dif*	Unidad de suelo	Promedio de cenizas café tostado %	Dif*
Salgar	4,45	A	Libano	5,00	A
La Montaña	4,32	B	Salgar	4,86	AB
Suroeste	4,30	B	La Espiga	4,79	BC
Quindío	4,19	C	Suroeste	4,72	BC
Malabar	4,18	CD	La Montaña	4,71	BC
Paujil	4,16	CD	San Simón	4,70	BC
Montenegro	4,13	D	Chinchiná	4,70	BC
Chinchiná	4,12	D	Malabar	4,64	BCD
Campo Alegre	4,12	D	Campo Alegre	4,63	CD
San Simón	4,09	D	Perijá	4,60	CD
Perijá	4,06	DE	Montenegro	4,52	D
Libano	4,06	DE	Quindío	4,50	D
Parnaso-200	4,05	DE	Paujil	4,49	D
La Espiga	4,01	EF	Parnaso-200	4,49	D
Siberia	3,94	F	Siberia	4,16	E

*Letras diferentes (Dif) para cada elemento indican diferencias entre rangos de altitud, Duncan (5%).

Abundancia. Los elementos químicos más abundantes en el grano de café verde fueron N, K, S, P, Ca, seguidos por Na, Rb, Fe, Mn, Si, Sr, Cu y Al (Tabla 6). En el café tostado el orden de abundancia de los elementos fue relativamente similar (Tabla 7). El potasio, azufre, magnesio, fósforo y calcio constituyeron el 63% del peso de las cenizas del café.

Los contenidos minerales con menor coeficiente de variación fueron en su orden: N, K, P, Mg, Ca, Cu, Na, Zn, los cuales son los elementos que están en mayor concentración en los granos de café, y además, corresponden a los elementos constituyentes más abundantes en los seres vivos, después del C, H y O.

Los coeficientes de variación cercanos o superiores a 100, registrados para el V, Tl, Te, Ti, As, Bi, Pd, Se, Cd, Sb, Ga y Al (Tabla 6), indican una alta variabilidad

de estos contenidos, que se asocian a las diferentes condiciones geográficas de las regiones, las propiedades de las unidades de suelos y la altitud del cultivo, que son los factores de estudio en esta investigación, pero también pueden influir en los niveles de estos elementos en los granos las sustancias que se usan como biocidas para el manejo del cultivo, los cuales contienen trazas de varios elementos (3, 16, 18, 26, 28, 35, 46, 47).

Nitrógeno. Se encontró como valor mínimo 1,31% y máximo 3,24% en el café verde, con un promedio de 2,04%. Puerta (4, 5) reportó contenidos de N de 1,65% para Borbón, 1,69% para Típica, 2,10% para Caturra y Colombia fruto rojo, y de 2,06% para Colombia fruto amarillo y valores de 2,06 a 2,11% para granos tostados de estas variedades. Sadeghian *et al.* (44) reportan un valor promedio de N de 1,89% en café almendra de la variedad Colombia.

Tabla 6. Promedios de los contenidos de elementos químicos en granos de **café verde** de fincas de Colombia, presentados en orden de abundancia.

Elemento químico	Unidades	Promedio	Mínimo	Máximo	Mediana	C.V. %	Error estándar de la media	Límite inferior de la media (95%)	Límite superior de la media (95%)
N	%	2,05	1,31	3,24	2,05	10,6	0,009	2,03	2,07
K	%	1,85	1,11	2,55	1,89	11,4	0,005	1,84	1,86
S	g.kg ⁻¹	3,26	0,18	12,30	3,02	40,9	0,031	3,20	3,32
Mg	g.kg ⁻¹	1,61	0,25	2,68	1,66	18,6	0,007	1,60	1,63
P	g.kg ⁻¹	1,38	0,21	1,96	1,40	15,0	0,005	1,38	1,39
Ca	g.kg ⁻¹	0,87	0,24	1,51	0,86	21,4	0,004	0,86	0,87
Na	mg.kg ⁻¹	67,33	8,52	205,90	63,44	41,7	0,651	66,06	68,61
Rb	mg.kg ⁻¹	53,32	1,99	224,00	44,61	59,9	0,740	51,87	54,77
Fe	mg.kg ⁻¹	21,53	2,55	141,10	20,00	47,9	0,239	21,06	22,00
Mn	mg.kg ⁻¹	17,04	0,41	81,40	15,43	54,1	0,214	16,62	17,46
Si	mg.kg ⁻¹	13,80	0,07	66,28	12,20	64,0	0,205	13,40	14,20
Sr	mg.kg ⁻¹	11,96	0,25	46,77	11,22	53,6	0,149	11,67	12,25
Cu	mg.kg ⁻¹	10,67	0,79	35,76	10,79	29,7	0,073	10,52	10,81
Al	mg.kg ⁻¹	10,21	0,00	123,20	7,26	99,5	0,236	9,75	10,67
B	mg.kg ⁻¹	7,44	0,00	43,87	6,90	43,1	0,074	7,30	7,59
Ba	mg.kg ⁻¹	6,14	0,01	24,13	5,23	61,5	0,088	5,97	6,31
Zn	mg.kg ⁻¹	3,92	0,19	11,51	3,79	38,7	0,035	3,85	3,99
Li	mg.kg ⁻¹	1,46	0,01	9,11	1,16	81,4	0,027	1,40	1,51
In	mg.kg ⁻¹	0,90	0,11	4,91	0,85	46,3	0,010	0,88	0,92
Ni	μg.kg ⁻¹	305,37	15,98	1.613,00	261,60	65,2	4,614	296,32	314,42
Sn	μg.kg ⁻¹	235,25	7,34	2.658,00	188,20	83,0	4,523	226,38	244,12
Ti	μg.kg ⁻¹	178,01	4,91	7.981,00	119,80	167,8	6,924	164,43	191,59
Co	μg.kg ⁻¹	96,11	1,86	655,10	67,39	91,0	2,028	92,13	100,08
Pt	μg.kg ⁻¹	90,17	0,04	663,60	85,77	51,6	1,078	88,06	92,29
Cr	μg.kg ⁻¹	76,71	9,28	969,10	61,40	78,8	1,400	73,96	79,45
Tl	μg.kg ⁻¹	23,75	0,00	179,20	0,00	170,8	0,940	21,91	25,60
Mo	μg.kg ⁻¹	22,13	0,00	179,80	17,60	89,0	0,456	21,24	23,03
Pb	μg.kg ⁻¹	19,60	0,00	109,00	18,62	74,5	0,339	18,93	20,26
Ge	μg.kg ⁻¹	19,43	0,00	89,40	19,01	72,6	0,327	18,79	20,07
La	μg.kg ⁻¹	16,11	0,00	51,86	15,19	44,2	0,165	15,79	16,43
Te	μg.kg ⁻¹	15,51	0,00	277,80	4,38	175,8	0,632	14,27	16,75
Ce	μg.kg ⁻¹	13,22	0,00	66,90	12,50	55,8	0,171	12,88	13,55
Ga	μg.kg ⁻¹	10,48	0,00	136,70	8,70	108,8	0,264	9,96	11,00
Au	μg.kg ⁻¹	8,62	0,00	47,33	7,37	88,8	0,177	8,28	8,97
As	μg.kg ⁻¹	8,04	0,00	109,30	0,00	182,3	0,340	7,37	8,71
V	μg.kg ⁻¹	4,92	0,00	349,40	2,72	338,3	0,385	4,16	5,67
Ag	μg.kg ⁻¹	4,78	0,00	25,31	4,50	68,6	0,076	4,63	4,93
Se	μg.kg ⁻¹	4,76	0,00	44,39	2,14	136,8	0,151	4,46	5,05
Sb	μg.kg ⁻¹	3,82	0,00	23,14	1,79	121,7	0,108	3,61	4,04

Continúa...

...continuación.

Elemento químico	Unidades	Promedio	Mínimo	Máximo	Mediana	C.V. %	Error estándar de la media	Límite inferior de la media (95%)	Límite superior de la media (95%)
Cd	µg.kg ⁻¹	2,80	0,00	73,50	2,27	132,6	0,086	2,64	2,97
Bi	µg.kg ⁻¹	2,26	0,00	31,76	0,66	163,7	0,086	2,09	2,43
Pd	µg.kg ⁻¹	1,74	0,00	25,33	0,00	169,6	0,068	1,60	1,87
Sc	µg.kg ⁻¹	1,27	0,00	10,28	1,03	93,2	0,027	1,22	1,33
Be	µg.kg ⁻¹	0,19	0,00	2,30	0,16	105,4	0,005	0,19	0,20

*CV: Coeficiente de Variación.

Tabla 7. Contenidos de elementos químicos en granos de **café tostado** de fincas de Colombia.

Elemento químico	Unidades	Promedio	Mínimo	Máximo	Mediana	C.V. %	Error estándar de la media	Límite inferior de la media (95%)	Límite superior de la media (95%)
N	%	2,10	1,52	2,64	2,12	6,7	0,006	2,09	2,11
K	%	1,92	1,36	2,66	1,94	9,6	0,004	1,91	1,93
S	g.kg ⁻¹	3,35	0,21	18,68	3,02	51,4	0,042	3,26	3,43
Mg	g.kg ⁻¹	1,65	0,59	4,34	1,66	22,3	0,009	1,63	1,67
P	g.kg ⁻¹	1,50	0,89	4,84	1,46	19,9	0,007	1,48	1,51
Ca	g.kg ⁻¹	0,92	0,38	2,43	0,91	25,1	0,006	0,91	0,93
Rb	mg.kg ⁻¹	70,55	2,23	347,60	54,68	78,0	1,334	67,94	73,17
Fe	mg.kg ⁻¹	36,05	0,00	208,70	26,85	82,9	0,719	34,64	37,46
Na	mg.kg ⁻¹	35,13	0,00	269,10	28,59	74,1	0,631	33,90	36,37
Si	mg.kg ⁻¹	24,25	0,00	293,40	12,28	120,6	0,703	22,87	25,62
Sr	mg.kg ⁻¹	23,51	2,27	163,50	15,56	89,7	0,508	22,51	24,51
Ba	mg.kg ⁻¹	19,24	0,05	266,90	10,04	125,4	0,581	18,10	20,38
Mn	mg.kg ⁻¹	18,84	0,07	94,62	17,32	57,1	0,259	18,33	19,35
Al	mg.kg ⁻¹	11,58	0,00	151,40	7,88	108,8	0,303	10,99	12,18
Cu	mg.kg ⁻¹	10,72	0,00	41,07	9,52	54,0	0,139	10,44	10,99
B	mg.kg ⁻¹	6,12	0,00	22,35	5,84	36,5	0,054	6,02	6,23
Zn	mg.kg ⁻¹	3,82	0,00	45,00	3,62	61,0	0,056	3,71	3,93
Li	mg.kg ⁻¹	1,26	0,00	16,94	0,44	162,7	0,050	1,16	1,36
In	mg.kg ⁻¹	0,90	0,00	7,66	0,77	63,3	0,014	0,87	0,93
Ni	µg.kg ⁻¹	255,30	1,69	2.152,00	192,85	87,9	5,433	244,64	265,95
Sn	µg.kg ⁻¹	231,64	0,00	3.278,00	155,80	105,9	5,964	219,94	243,33
Ti	µg.kg ⁻¹	180,23	0,00	4.755,00	126,30	141,5	6,197	168,08	192,38
Pt	µg.kg ⁻¹	126,57	0,00	685,90	105,50	77,0	2,371	121,92	131,22
Co	µg.kg ⁻¹	108,17	2,33	748,30	74,04	95,8	2,511	103,25	113,10
Cr	µg.kg ⁻¹	66,96	0,00	829,30	51,17	95,2	1,544	63,94	69,99
Te	µg.kg ⁻¹	36,81	0,00	320,60	14,95	138,7	1,273	34,31	39,31
Mo	µg.kg ⁻¹	27,12	0,00	178,30	20,79	89,7	0,589	25,96	28,27
Pb	µg.kg ⁻¹	20,44	0,00	210,20	13,85	112,9	0,559	19,35	21,54
As	µg.kg ⁻¹	20,26	0,00	99,27	13,67	105,3	0,532	19,22	21,31
Ge	µg.kg ⁻¹	18,92	0,00	138,90	13,19	102,5	0,476	17,99	19,86

Continúa...

...continuación.

Elemento químico	Unidades	Promedio	Mínimo	Máximo	Mediana	C.V. %	Error estándar de la media	Límite inferior de la media (95%)	Límite superior de la media (95%)
La	μg.kg ⁻¹	15,19	0,00	65,60	13,57	71,2	0,262	14,68	15,70
Ce	μg.kg ⁻¹	14,42	0,00	113,03	12,35	87,3	0,305	13,82	15,02
Ga	μg.kg ⁻¹	12,69	0,00	116,30	9,37	103,2	0,318	12,07	13,32
Se	μg.kg ⁻¹	10,15	0,00	79,93	6,28	124,7	0,316	9,53	10,77
Au	μg.kg ⁻¹	10,08	0,00	68,48	4,86	123,7	0,305	9,48	10,68
Pd	μg.kg ⁻¹	8,90	0,00	104,10	2,37	188,5	0,411	8,10	9,71
V	μg.kg ⁻¹	6,03	0,00	259,00	3,05	232,6	0,340	5,36	6,69
Bi	μg.kg ⁻¹	5,85	0,00	51,63	2,02	156,8	0,229	5,41	6,30
Sb	μg.kg ⁻¹	5,70	0,00	61,33	4,22	119,9	0,170	5,37	6,04
Ag	μg.kg ⁻¹	5,69	0,00	127,40	3,60	131,7	0,182	5,33	6,04
Cd	μg.kg ⁻¹	2,97	0,00	21,98	2,59	83,4	0,060	2,85	3,08
Tl	μg.kg ⁻¹	1,25	0,00	58,60	0,00	497,2	0,151	0,96	1,55
Sc	μg.kg ⁻¹	1,21	0,00	38,24	0,90	153,7	0,045	1,12	1,30
Be	μg.kg ⁻¹	0,70	0,00	15,02	0,46	116,6	0,020	0,66	0,74

*CV: Coeficiente de Variación.

El nitrógeno se adiciona como fertilizante al cafetal para el crecimiento, la formación de frutos y la producción. En la tostación del café, los aminoácidos del grano se transforman mediante las reacciones como Maillard y Strecker, y así se forman sustancias nitrogenadas como pirazinas, aldehídos, cetonas, melanoidinas, pirroles, piridinas, ácido nicotínico, entre otros, que dan sabor, color y aroma a la bebida de café (8, 34).

Potasio. Representó alrededor del 40% al 45% del peso de las cenizas del grano de café, con un valor promedio de 1,90% y valores mínimos y máximos de 1,29% y 2,50%. Se reportan en la literatura contenidos promedio de 1,10% a 1,51% de K en variedades Arábica (4, 5), un promedio de 1,39% en la variedad Colombia (44) y valores de 1,63% a 1,70% para excelso de Colombia, de 1,68% para café de Costa Rica y Kenia, de 1,77% a 1,88% para Brasil, valores de 1,84% a 2,00% para café Robusta de Uganda, Costa de Marfil, Ghana y Sierra Leona (7), y para café verde de Brasil de 1,52% a 1,98% (6).

En café tostado, valores promedio de 1,92% para café de Colombia, 1,86% para Costa Rica, 1,90% para Guatemala y 1,75% para Kenia (2).

El potasio hace parte de los fertilizantes del café necesarios para un adecuado crecimiento y resistencia de la planta, y facilita la actividad enzimática, el transporte de agua, nutrientes y azúcares y el control de la apertura estomatal (49). No hace parte de los compuestos químicos del sabor y aroma del café (34) y no se conoce su contribución a la calidad de la bebida de café.

Azufre. Conformó un 7,9% de las cenizas del grano de café, con un promedio de 3,00 g.kg⁻¹ y un coeficiente de variación del 40,9%. Anderson y Smith (2) presentaron un valor medio que correspondió a 1,48 g.kg⁻¹ para café tostado de Colombia, y Sadeghian *et al.* (44), 0,11% en café verde de la variedad Colombia. El azufre hace parte de los aminoácidos que conforman las proteínas del café y que se transforman en la tostación

del café en sustancias volátiles como tiofenos y tiazoles que tienen olores característicos y fuertes (8, 15, 34). Kawakami *et al.* (17) encontraron mayores concentraciones de S en el café tostado oscuro y en Robusta comparado con Arábica.

Magnesio. Constituyó un 3,9% de las cenizas del grano de café, con un valor promedio de 1,65 g.kg⁻¹ (C.V. 18,6%), valor similar a 0,16% a 0,17% para las variedades Arábica de Colombia y de 0,17% en café de la variedad Colombia (4, 5, 44). En la literatura se refieren contenidos de Mg en café de otros orígenes geográficos desde 0,058 a 0,390% (20, 22). El magnesio es un elemento de la molécula de la clorofila (49).

Fósforo. El contenido medio de P fue de 1,40 g.kg⁻¹ y conformó el 3,4% de las cenizas. Anderson y Smith (2) indican contenidos de 1,98 g.kg⁻¹ de P en el café tostado de Colombia, entre 1,10 y 1,60 g.kg⁻¹ en café verde de variedades Arábica (4,5) y un promedio de 0,16% en café verde de la variedad Colombia (44). El fósforo es importante en la etapa de almácigo y durante la fase de establecimiento de las plantas, así como antes de la floración y para impulsar el crecimiento radicular (49).

Calcio. Según la literatura el Ca es importante para el desarrollo productivo, la maduración y la obtención de granos de calidad (49). Constituyó un 2,1% de las cenizas del grano de café. Los contenidos de Ca en el grano de café variaron entre 0,86 y 1,46 g.kg⁻¹, valores que están dentro del rango de 0,23 a 4,00 g.kg⁻¹ (7, 22, 40), y entre 1,10 y 1,60 g.kg⁻¹ para granos de las variedades Arábica (4, 5) y de 0,16% en la variedad Colombia (44). Para café tostado de Colombia se conocen valores de 1,13 g.kg⁻¹ (2) y entre 0,8 y 1,2 g.kg⁻¹ (32). En café de Brasil, Morgano *et al.* (25) presentaron valores promedio de 0,83 g.kg⁻¹.

Sodio. Su contenido varió entre 12,23 y 173,79 mg.kg⁻¹, con un promedio de 64,20 mg.kg⁻¹, mientras que Ferreira *et al.* (13) encontraron 6 mg.kg⁻¹ de Na en café de Angola; Clarke y Macrae (6) reportan valores entre 4 y 174 mg.kg⁻¹ de Na, y Anderson y Smith (2) un valor medio de 40,1 mg.kg⁻¹ en café tostado.

Rubidio. Varió de 0,81 a 197,47 mg.kg⁻¹ con un promedio de 44,55 mg.kg⁻¹. Para café Arábica de Brasil se reportaron contenidos entre 6,50 a 48,50 mg.kg⁻¹ (20); para café verde Arábica y Robusta de Angola se reportaron valores entre 20,8 a 182 mg.kg⁻¹ (40) y de 6,63 a 41,96 mg.kg⁻¹ (13) y entre 2,66 a 102,71 mg.kg⁻¹ para café de varios países (32). Zaidi y Tagliaferro *et al.*, citados por Pohl *et al.* (30), presentaron valores de 12,3 a 34,0 mg.kg⁻¹ para café verde de varios países.

Hierro. Varió de 4,69 a 135,33 mg.kg⁻¹ con un promedio de 20,19 mg.kg⁻¹, valores que están dentro de los rangos reportados para variedades Arábica de Colombia, de 23 a 150 mg.kg⁻¹ en café verde y de 38,47 a 52,40 mg.kg⁻¹ en café tostado (4, 5), y de 37,15 mg.kg⁻¹ en café verde de la variedad Colombia (44). Para café de Brasil se encontraron valores de 22,89 a 37,58 mg.kg⁻¹ (22) y para café de otros países valores de 16,46 a 632,33 mg.kg⁻¹ (32).

Manganeso. Es parte de las enzimas del grano y presentó una variación de 0,62 a 79,84 mg.kg⁻¹ con un promedio de 15,55 mg.kg⁻¹ en el café de las fincas. Pertoldi *et al.* (29) encontraron contenidos de 28,16 mg.kg⁻¹ de Mn en café de Colombia, mientras que los cafés Robusta de otros países presentaron valores de 1,33 a 3,73 mg.kg⁻¹. Oleszczuk *et al.* (27) reportaron un valor de 50,5 ± 0,6 mg.kg⁻¹ de Mn en granos de café de Colombia, Sadeghian *et al.* (44) un valor

promedio de Mn de 42,25 mg.kg⁻¹ en café de la variedad Colombia, mientras Clarke y Macrae (6) resaltaron altos los valores de manganeso de 25 a 60 mg.kg⁻¹ en café Arabica de acuerdo con el reporte de Wilbaux, en comparación con 10,00 a 33,00 mg.kg⁻¹ en Robusta.

Elementos pesados. Los elementos pesados tienen una densidad mayor a 5 g.cm⁻³ y son muy tóxicos a ciertas dosis para diferentes sistemas humanos y animales y para el agua y el medio ambiente (3, 16, 18, 26, 28, 31, 35, 46, 47). En el grano de café se encontraron niveles de Be, Sc, Pd, Bi, Cd, Se y Sb menores a 2 µg.kg⁻¹, incluso no se detectaron en varias muestras, lo cual es favorable para la inocuidad del café de Colombia.

Es importante aclarar que no hay límites internacionales de los metales pesados para el café; para tener una referencia se toman los límites publicados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) para el agua potable. Todos los granos de café analizados presentaron algún contenido de Zn, Cu, Ni y Cr. El 5,3% de las muestras de café de Antioquia contenían niveles superiores a 200 µg.kg⁻¹ de cromo.

En cuanto al Ni, se destacaron los valores superiores a 1.000 µg.kg⁻¹, los cuales se encontraron en los granos de café de Antioquia (Concordia, unidad de suelo Parnaso-200, altitudes 1.650 y 1.868 m; Fredonia, unidad de suelo Suroeste, altitud 1.526 m; Andes, unidad de suelo Suroeste, altitud 1.215 m), en Caldas (Manizales, unidad de suelo Chinchiná, altitud 1.050 m), Huila (Iquira y Aipe, unidad de suelo San Simón, altitudes 1.724 a 1.750 m y Campoalegre, unidad de suelo Campoalegre, altitud 1.450 a 1.500 m).

Los contenidos de As, Cd, Cr, Ni, Pb, Sb y Zn en los granos de café de las fincas fueron menores que los datos reportados para café verde por Quijano y Spetel (40) y por Anderson y Smith (2) para café tostado de Colombia, a excepción del Cu que varió de 1,16 a 25,13 mg.kg⁻¹, similar a los valores presentados por Ferreira *et al.* (13) en café de Angola (1,00 a 33,00 mg.kg⁻¹). Maier, citado por Clarke y Macrae (6), reportó un valor de 0,8 mg.kg⁻¹ de Pb en granos de café, mientras que Pertoldi *et al.* (29) encontraron contenidos de Pb entre 0,5 ppm y 1 ppm en el café espresso. De otra parte, en café Arabica se encontraron valores de Zn en el grano de 2,45 a 57,0 mg.kg⁻¹ (13, 29, 41) y de 1,33 a 15,61 mg.kg⁻¹ en Robusta (13, 22, 29, 42).

Roffi *et al.* (42) no detectaron Bi, Cs, Ga, Se, Ti, V ni Pb en los granos de café de Angola, y Ferreira *et al.* (13) encontraron alta variabilidad en el contenido de Cr del café de Angola. Santos y Oliveira (45) indicaron que las variaciones de los elementos incluyendo al Cr pueden deberse a las condiciones en los procesos industriales y de cultivo. Rago *et al.* (41) atribuyeron al tipo de extracción la ocurrencia de metales pesados como Mn, Fe, Cu y Zn, en bebidas de café soluble que se comercializaban en Portugal.

Considerando la información de la literatura y de las etiquetas de los productos químicos usados en la agricultura (3, 16, 18, 26, 28, 42, 46, 47), se atribuyen como las posibles fuentes de As, Bi, Cd, Cr, Ni, Pb y Sb, en el grano de café, además de factores geográficos y geológicos, a las aguas y suelos contaminados, a través de sustancias químicas usadas en los cultivos como son los insecticidas, herbicidas y fungicidas, y a las actividades mineras e industriales cercanas a las zonas de producción, así como por yacimientos y actividad volcánica.

Diferencias estadísticas. Se encontraron diferencias estadísticas, prueba Duncan (5%), en el contenido promedio de varios elementos químicos en el grano de café verde. Se destacan las diferencias significativas en las concentraciones de elementos en los granos de café de Quindío, mayores concentraciones medias de Ba (11,2 mg.kg⁻¹), Ca (1.009,6 mg.kg⁻¹) y Sr (17,7 mg.kg⁻¹), del Huila por los mayores contenidos de P (1.470,1 mg.kg⁻¹) y en Cesar y Quindío por los menores contenidos de P (1.272,1 y 1.295,6 mg.kg⁻¹), así como mayores contenidos de Mn en Huila (18,4 mg.kg⁻¹) y Antioquia (22,8 mg.kg⁻¹). Igualmente, por la mayor concentración de S con respecto al promedio en el café del Huila (3.432,3 mg.kg⁻¹) y en Antioquia (3.911,7 mg.kg⁻¹).

Sin embargo, las mayores diferencias se observaron por los factores material parental, la unidad de suelos, el rango de altitud y la variedad. Como se ha demostrado, para el café de Colombia existe dependencia entre el departamento y el rango de altitud, entre el departamento y la unidad de suelo y el material parental, también entre el rango de altitud y la unidad de suelo (39). Por ejemplo, la variedad Maragogipe de Antioquia presentó mayores contenidos medios de Ge, Ga, Fe, Co, Mn y Ni.

Entre rangos de altitud hubo diferencias significativas en los contenidos de As, Ba, Bi, Ca, Cr, Cu, In, K, Li, Mg, Mo, Ni, P, Pd, Pt, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Te y Zn, en el grano de café y una tendencia positiva o negativa (Tabla 8). Así, a medida que aumentó la altitud del cultivo se encontró mayor concentración de As, Bi, Cr, In, Mg, Ni, P, Pd, Pt, Sb, Se, Te y Zn en el café; por el contrario, las concentraciones de Ba, Ca, Cu, K, Li, Mo, Rb, Sc, Sr fueron menores. En las Tablas 9 y 10 se observan los resultados de las diferencias estadísticas

en los contenidos de los elementos químicos en los granos de café según los materiales parentales y la unidad de suelos.

Relaciones estadísticas. Los mayores valores de las correlaciones (*Pearson*) entre los contenidos de elementos presentaron coeficientes entre 0,60 y 0,70, así: entre el Mn y S, coeficiente 0,68; Mg y P coeficiente 0,71; Ti y V coeficiente 0,70; Ga y V coeficiente 0,67; entre el departamento Quindío con el Ba y el Sr la correlación fue mayor a 0,70, lo cual permite estimar uno de los elementos con base en la determinación química cuantitativa en el laboratorio del otro.

Análisis de las diferencias. Se encontraron 24 elementos en todas las muestras de café de las fincas: N, K, S, Mg, P, Ca, Na, Rb, Fe, Mn, Si, Sr, Cu, B, Ba, Zn, Li, In, Ni, Sn, Ti, Co, Pt y Cr. Por el contrario, 20 elementos, Tl, Pd, As, Se, Bi, Be, Sb, Te, Au, Sc, Ga, Ge, Cd, Ag, V, Mo, Al, Pb, La y Ce, no se detectaron en varias muestras y en café de algunas fincas (Tablas 11 y 12).

Es de destacar que el Talio no se detectó en el café de fincas de Caldas, ubicadas por debajo de 1.300 m, y en el Cesar por encima 1.600 m. Igualmente, no se detectó As ni Pd en el café de la unidad Parnaso-200 de Antioquia, a altitud por debajo de 1.300 m. Tampoco se detectó Pd en el café de la unidad Malabar del Quindío, de lotes ubicados por debajo de 1.300 m.

Por el contrario, en el grano de café procedente de todas las fincas con unidades de suelos La Montaña en el Cesar, Paujil en Santander, Salgar en Antioquia y unidad Quindío en Quindío se detectaron los 44 elementos analizados. Por fincas, los elementos con frecuencia ausentes en el café verde fueron Tl, seguido por Pd, Se, As, Bi y Sb.

Tabla 8. Diferencias y abundancia en el contenido de los 44 elementos químicos en granos de café verde, entre rangos de altitud de fincas cafeteras de Colombia. Unidades de medición +.

Rango de altitud	Promedio (Ag)	Dif	Promedio (Al)	Dif	Promedio (As)	Dif	Promedio (Au)	Dif
<1.300 m	5,46	C++	10,49	A	3,83	A	9,81	B
1.300 a 1.600 m	4,33	A	9,88	A	7,36	B	8,01	A
>1.600 m	4,84	B	10,41	A	11,82	C	8,54	A
Rango de altitud	Promedio (B)	Dif	Promedio (Ba)	Dif	Promedio (Be)	Dif	Promedio (Bi)	Dif
<1.300 m	7,52	A	9,02	C	0,19	A	1,44	A
1.300 a 1.600 m	7,45	A	6,03	B	0,20	A	2,04	B
>1.600 m	7,38	A	4,25	A	0,20	A	3,12	C
Rango de altitud	Promedio (Ca)	Dif	Promedio (Cd)	Dif	Promedio (Ce)	Dif	Promedio (Co)	Dif
<1.300 m	0,99	C	3,17	B	13,47	B	93,59	A
1.300 a 1.600 m	0,86	B	2,64	A	12,39	A	87,33	A
>1.600 m	0,75	A	2,74	AB	14,04	B	108,11	B
Rango de altitud	Promedio (Cr)	Dif	Promedio (Cu)	Dif	Promedio (Fe)	Dif	Promedio (Ga)	Dif
<1.300 m	63,74	A	11,18	B	20,33	A	10,19	AB
1.300 a 1.600 m	79,23	B	10,53	A	22,06	B	11,16	B
>1.600 m	82,79	B	10,47	A	21,74	B	9,88	A
Rango de altitud	Promedio (Ge)	Dif	Promedio (In)	Dif	Promedio (K)	Dif	Promedio (La)	Dif
<1.300 m	19,86	B	0,83	A	1,88	B	16,05	B
1.300 a 1.600 m	18,16	A	0,87	A	1,88	B	16,92	B
>1.600 m	20,60	B	0,99	B	1,79	A	1,79	A
Rango de altitud	Promedio (Li)	Dif	Promedio (Mg)	Dif	Promedio (Mn)	Dif	Promedio (Mo)	Dif
<1.300 m	1,66	B	1,51	A	15,42	A	27,13	B
1.300 a 1.600 m	1,60	B	1,63	B	14,93	A	23,61	B
>1.600 m	1,14	A	1,67	B	20,71	B	16,82	A

Continúa...

...continuación.

Rango de altitud	Promedio (N)	Dif	Promedio (Na)	Dif	Promedio (Ni)	Dif	Promedio (P)	Dif
<1.300 m	2,07	A	70,52	B	221,69	A	1,29	A
1.300 a 1.600 m	2,04	A	67,54	AB	328,54	B	1,39	B
>1.600 m	2,05	A	64,82	A	336,24	B	1,44	C
Rango de altitud	Promedio (Pb)	Dif	Promedio (Pd)	Dif	Promedio (Pt)	Dif	Promedio (Rb)	Dif
<1.300 m	20,59	AB	1,48	A	83,69	A	70,67	C
1.300 a 1.600 m	18,63	A	1,55	A	89,55	B	50,82	B
>1.600 m	21,18	B	2,15	B	95,50	B	44,00	A
Rango de altitud	Promedio (S)	Dif	Promedio (Sb)	Dif	Promedio (Sc)	Dif	Promedio (Se)	Dif
<1.300 m	3,19	B	2,82	A	1,51	C	3,50	A
1.300 a 1.600 m	2,93	A	3,61	B	1,28	B	4,67	B
>1.600 m	3,71	C	4,79	C	1,10	A	5,76	C
Rango de altitud	Promedio (Si)	Dif	Promedio (Sn)	Dif	Promedio (Sr)	Dif	Promedio (Te)	Dif
<1.300 m	14,08	A	243,12	A	15,5	B	11,62	A
1.300 a 1.600 m	13,77	A	238,85	A	11,62	B	14,02	A
>1.600 m	13,61	A	225,35	A	9,88	A	20,05	B
Rango de altitud	Promedio (Ti)	Dif	Promedio (Tl)	Dif	Promedio (V)	Dif	Promedio (Zn)	Dif
<1.300 m	187,47	A	24,23	A	4,81	A	3,42	A
1.300 a 1.600 m	186,19	A	23,31	A	5,70	A	3,96	B
>1.600 m	161,43	A	23,96	A	4,04	A	4,23	B

+ Unidades: % N y K; g kg⁻¹, S, Mg, P, Ca; mg kg⁻¹ (ppm) para Na, Rb, Fe, Mn, Si, Sr, Cu, Al, B, Ba, Zn, Li, In; µg kg⁻¹, Ni, Sn, Ti, Co, Pt, Cr, Tl, Mo, Pb, Ge, La, Te, Ce, Ga, Au, As, V, Ag, Se, Sb, Cd, Bi, Pd, Sc, Be. ++ Para cada elemento, letras diferentes entre rangos de altitud indican diferencias significativas, Duncan (5%).

Tabla 9. Diferencias y abundancia en el contenido de los 44 elementos químicos en granos de café verde, entre materiales parentales de fincas cafeteras de Colombia. Unidades de medición +.

Material parental	Promedio (Ag)	Dif	Promedio (Al)	Dif	Promedio (As)	Dif	Promedio (Au)	Dif
Ceniza volcánica	4,07	A++	9,15	A	4,21	A	8,53	A
Ígneo - volcánica	6,78	C	12,85	B	4,33	A	11,37	B
Ígneo intrusivo	4,38	A	9,96	AB	16,39	B	7,20	A
Ígneo extrusivo	5,70	B	10,28	AB	4,57	A	10,29	B
Metamórfico	5,90	BC	13,08	B	3,06	A	10,10	B
Sedimentario	5,03	AB	11,71	AB	4,33	A	7,81	A
Material parental	Promedio (B)	Dif	Promedio (Ba)	Dif	Promedio (Be)	Dif	Promedio (Bi)	Dif
Ceniza volcánica	7,66	C	8,91	C	0,176	AB	1,76	AB
Ígneo - volcánica	6,23	A	6,20	B	0,234	BC	1,04	A
Ígneo intrusivo	7,56	BC	3,75	A	0,16	A	2,29	B
Ígneo extrusivo	7,74	C	5,21	B	0,28	C	3,94	C
Metamórfico	6,89	ABC	4,89	AB	0,25	BC	3,69	C
Sedimentario	6,41	AB	5,38	B	0,16	AB	1,10	AB
Material parental	Promedio (Ca)	Dif	Promedio (Cd)	Dif	Promedio (Ce)	Dif	Promedio (Co)	Dif
Ceniza volcánica	098	C	2,86	A	13,45	AB	75,66	A
Ígneo - volcánica	0,90	B	2,45	A	12,64	AB	69,13	A
Ígneo intrusivo	0,77	A	3,02	A	12,25	A	79,31	A
Ígneo extrusivo	0,75	A	2,55	A	12,77	AB	159,45	B
Metamórfico	0,90	B	2,90	A	15,35	BC	131,63	B
Sedimentario	0,92	B	2,45	A	17,50	C	147,41	B
Material parental	Promedio (Cr)	Dif	Promedio (Cu)	Dif	Promedio (Fe)	Dif	Promedio (Ga)	Dif
Ceniza volcánica	67,09	A	10,84	AB	21,74	C	11,03	AB
Ígneo - volcánica	59,44	A	11,47	B	16,58	A	7,71	A
Ígneo intrusivo	79,70	B	10,14	A	22,80	C	9,48	AB

Continúa...

...continuación.

Ígneo extrusivo	93,01	C	11,12	B	21,24	BC	12,13	B
Metamórfico	66,06	A	10,66	AB	17,51	AB	8,82	AB
Sedimentario	105,02	C	9,77	A	23,39	C	13,11	B
Material parental	Promedio (Ge)	Dif	Promedio (In)	Dif	Promedio (K)	Dif	Promedio (La)	Dif
Ceniza volcánica	17,14	A	0,94	B	1,87	BC	17,81	C
Ígneo - volcánica	21,68	B	0,59	A	1,93	C	12,92	A
Ígneo intrusivo	19,93	AB	0,89	B	1,85	B	16,45	B
Ígneo extrusivo	22,27	B	0,99	B	1,72	A	14,93	AB
Metamórfico	17,66	AB	0,84	B	1,91	BC	12,38	A
Sedimentario	20,74	AB	0,95	B	1,88	BC	13,79	A
Material parental	Promedio (Li)	Dif	Promedio (Mg)	Dif	Promedio (Mn)	Dif	Promedio (Mo)	Dif
Ceniza volcánica	1,80	C	1,55	B	16,38	B	24,02	B
Ígneo - volcánica	1,31	AB	1,55	B	12,028	A	37,54	C
Ígneo intrusivo	1,17	A	1,73	D	15,74	B	19,62	A
Ígneo extrusivo	1,27	A	1,65	C	21,72	C	17,33	A
Metamórfico	1,29	AB	1,38	A	18,45	BC	19,07	A
Sedimentario	1,68	BC	1,53	B	20,44	C	18,71	A
Material parental	Promedio (N)	Dif	Promedio (Na)	Dif	Promedio (Ni)	Dif	Promedio (P)	Dif
Ceniza volcánica	2,11	C	72,28	C	294,13	B	1,34	B
Ígneo - volcánica	2,02	AB	60,94	AB	189,08	A	1,25	A
Ígneo intrusivo	1,96	A	64,17	ABC	274,30	B	1,47	D
Ígneo extrusivo	2,09	BC	69,12	BC	386,39	C	1,41	C
Metamórfico	2,02	AB	63,25	ABC	405,79	C	1,31	AB
Sedimentario	2,03	AB	58,16	A	394,41	C	1,33	AB
Material parental	Promedio (Pb)	Dif	Promedio (Pd)	Dif	Promedio (Pt)	Dif	Promedio (Rb)	Dif
Ceniza volcánica	17,55	A	1,13	A	85,271	B	58,99	C
Ígneo - volcánica	22,54	B	2,39	BC	70,92	A	95,15	D

Continúa...

...continuación.

Ígneo intrusivo	20,42	AB	2,53	C	98,48	C	50,13	B
Ígneo extrusivo	21,19	AB	1,63	AB	92,10	BC	27,74	A
Metamórfico	23,48	B	0,93	A	77,75	AB	55,58	BC
Sedimentario	16,37	A	1,16	A	102,31	C	47,04	B
Material parental	Promedio (S)	Dif	Promedio (Sb)	Dif	Promedio (Sc)	Dif	Promedio (Se)	Dif
Ceniza volcánica	3,11	AB	3,00	B	1,52	B	4,38	B
Ígneo - volcánica	2,80	A	1,54	A	0,96	A	2,27	A
Ígneo intrusivo	3,03	A	5,60	C	1,25	A	6,17	C
Ígneo extrusivo	3,99	C	4,74	C	1,16	A	4,99	BC
Metamórfico	3,60	BC	1,60	AB	0,78	A	2,68	AB
Sedimentario	3,69	C	1,33	A	1,01	A	3,68	AB
Material parental	Promedio (Si)	Dif	Promedio (Sn)	Dif	Promedio (Sr)	Dif	Promedio (Te)	Dif
Ceniza volcánica	13,53	A	233,44	B	14,76	D	11,41	A
Ígneo - volcánica	12,69	A	268,47	BC	12,62	C	4,50	A
Ígneo intrusivo	14,37	A	188,20	A	11,05	BC	19,91	B
Ígneo extrusivo	13,14	A	247,65	BC	10,39	B	23,02	B
Metamórfico	14,93	A	311,53	CD	6,02	A	8,13	A
Sedimentario	14,74	A	360,73	D	7,85	A	15,75	AB
Material parental	Promedio (Ti)	Dif	Promedio (Tl)	Dif	Promedio (V)	Dif	Promedio (Zn)	Dif
Ceniza volcánica	207,12	A	18,43	A	5,13	A	3,80	B
Ígneo - volcánica	116,44	A	33,82	B	4,16	A	2,79	A
Ígneo intrusivo	164,08	A	23,20	AB	5,14	A	4,19	C
Ígneo extrusivo	161,91	A	23,29	AB	3,46	A	4,41	C
Metamórfico	135,35	A	52,53	C	8,43	A	3,88	BC
Sedimentario	234,68	A	25,64	AB	3,79	A	3,39	AB

+ Unidades: % N y K; g kg⁻¹, S, Mg, P, Ca; mg kg⁻¹ (ppm) para Na, Rb, Fe, Mn, Si, Sr, Cu, Al, B, Ba, Zn, Li, In; µg kg⁻¹, Ni, Sn, Ti, Co, Pt, Cr, Tl, Mo, Pb, Ge, La, Te, Ce, Ga, Au, As, V, Ag, Se, Sb, Cd, Bi, Pd, Sc, Be. ++ Para cada elemento, letras diferentes entre material parental indican diferencias significativas, Duncan (5%).

Tabla 10. Diferencias y abundancia en el contenido de los 44 elementos químicos en granos de café verde, entre unidades de suelos de fincas cafeteras de Colombia. Unidades de medición +.

Unidad de suelo	Promedio (Ag)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Al)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (As)	Dif
Salgar	6,94	A++	Paujil	13,80	A	La Espiga	19,82	A
La Montaña	6,78	A	La Montaña	12,85	A	San Simón	17,72	A
Siberia	5,86	A	Suroeste	11,90	AB	Campo Alegre	10,53	B
Suroeste	5,51	AB	Salgar	11,86	ABC	Libano	7,41	BC
La Espiga	5,48	AB	Perijá	11,46	ABC	Suroeste	5,90	BC
Parnaso-200	5,40	AB	Siberia	11,05	ABC	Quindío	5,36	BC
Paujil	5,28	ABC	Malabar	10,44	ABC	Salgar	4,76	BC
Malabar	5,09	ABC	San Simón	10,32	ABC	Parnaso-200	4,64	BC
Montenegro	4,65	BC	Campo Alegre	10,02	ABC	Siberia	4,54	BC
San Simón	4,46	BC	Chinchiná	9,84	ABC	La Montaña	4,33	BC
Perijá	4,42	BCD	Libano	9,33	ABC	Montenegro	3,69	BC
Chinchiná	4,26	CD	Montenegro	9,13	BC	Chinchiná	3,51	BC
Campo Alegre	3,61	DE	Parnaso-200	8,79	BC	Malabar	3,41	BC
Libano	3,27	DE	Quindío	8,06	C	Perijá	2,38	C
Quindío	2,77	E	La Espiga	7,12	C	Paujil	2,06	C

Unidad de suelo	Promedio (Au)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (B)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Ba)	Dif
Malabar	12,78	A	Libano	8,83	A	Montenegro	11,39	A
Salgar	11,73	A	Siberia	8,28	A	Quindío	10,85	A
La Montaña	11,37	A	Montenegro	8,24	A	Malabar	10,06	A
Siberia	10,62	A	San Simón	7,71	AB	Salgar	6,67	B
Montenegro	10,33	A	Campo Alegre	7,34	ABC	Suroeste	6,51	B
Parnaso-200	9,67	A	Chinchiná	7,22	ABC	La Montaña	6,20	B
Paujil	9,14	AB	Malabar	7,19	ABCD	Libano	6,17	B
Suroeste	9,03	AB	Paujil	7,11	BCD	Siberia	6,08	B
Quindío	8,63	AB	Quindío	6,95	BCD	Chinchiná	5,76	B

Continúa...

...continuación.

La Espiga	8,62	AB	La Espiga	6,87	BCD	Perijá	3,97	C
San Simón	7,12	B	Parnaso-200	6,72	BCD	San Simón	3,92	C
Campo Alegre	6,83	B	Salgar	6,52	BCD	Paujil	3,83	C
Chinchiná	6,55	B	Perijá	6,48	CD	Parnaso-200	3,56	C
Perijá	6,28	B	Suroeste	6,36	CD	Campo Alegre	3,38	C
Líbano	6,20	B	La Montaña	6,23	D	La Espiga	3,35	C
Unidad de suelo	Promedio (Be)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Bi)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Ca)	Dif
Siberia	0,35	A	Paujil	5,38	A	Montenegro	1,03	A
Paujil	0,30	A	Siberia	4,49	A	Suroeste	0,96	AB
La Montaña	0,23	B	Parnaso-200	2,88	B	Quindío	0,96	AB
Perijá	0,22	B	Campo Alegre	2,46	BC	Malabar	0,95	AB
Chinchiná	0,21	B	San Simón	2,35	BC	Chinchiná	0,95	B
La Espiga	0,18	BC	Chinchiná	2,14	BC	Líbano	0,94	B
Quindío	0,17	BC	Malabar	2,09	BCD	Paujil	0,91	BC
Montenegro	0,16	BC	Líbano	1,75	BCD	La Montaña	0,90	BC
San Simón	0,16	BC	Montenegro	1,60	BCD	Salgar	0,89	BC
Campo Alegre	0,16	BC	Perijá	1,54	BCD	Perijá	0,86	CD
Líbano	0,15	BC	La Espiga	1,52	BCD	La Espiga	0,80	DE
Salgar	0,15	BC	Quindío	1,35	CD	Campo Alegre	0,79	E
Parnaso-200	0,15	C	La Montaña	1,04	CD	Parnaso-200	0,77	E
Suroeste	0,12	C	Salgar	0,81	CD	San Simón	0,76	E
Malabar	0,05	C	Suroeste	0,75	D	Siberia	0,73	F
Unidad de suelo	Promedio (Cd)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Ce)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Co)	Dif
La Espiga	5,57	A	Suroeste	18,95	A	Salgar	248,6	A
Malabar	3,61	AB	Salgar	18,10	AB	Suroeste	188,3	B
Montenegro	3,41	B	Malabar	17,82	ABC	Malabar	182,5	B
Salgar	3,17	B	Perijá	15,68	BC	Siberia	178,7	B

Continúa...

...continuación.

	Promedio (Cr)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Cu)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Fe)	Dif
Libano	2,92	B	Chinchiná	15,38	BC	Libano	149,1	C
San Simón	2,81	B	Parnaso-200	15,29	BC	Parnaso-200	122,6	D
Paujil	2,74	B	Paujil	13,74	CD	Chinchiná	103,98	E
Siberia	2,71	B	La Espiga	13,18	CD	La Espiga	90,60	EF
Perijá	2,68	B	San Simón	12,77	D	Paujil	87,86	EF
Quindío	2,62	B	La Montaña	12,64	D	Campo Alegre	86,43	EF
Campo Alegre	2,56	B	Libano	12,51	DE	San Simón	76,21	F
La Montaña	2,45	B	Quindío	12,35	DE	La Montaña	69,13	F
Suroeste	2,28	B	Montenegro	12,31	DE	Perijá	60,75	FG
Chinchiná	2,26	B	Siberia	11,45	DE	Quindío	44,82	G
Parnaso-200	2,25	B	Campo Alegre	10,11	E	Montenegro	43,89	G
Unidad de suelo	Promedio (Cr)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Cu)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Fe)	Dif
Suroeste	114,55	A	Libano	12,20	A	Malabar	25,06	A
Siberia	104,45	A	Parnaso-200	11,56	A	Campo Alegre	24,22	A
Perijá	93,15	AB	La Montaña	11,47	A	Suroeste	24,00	A
Campo Alegre	84,83	B	Montenegro	11,46	A	Siberia	22,96	A
Quindío	81,73	BC	Paujil	11,40	AB	San Simón	22,64	A
San Simón	79,74	BC	Siberia	10,89	AB	Perijá	22,63	A
Salgar	73,05	BCD	Malabar	10,59	ABC	Libano	22,28	A
Parnaso-200	71,16	BCD	Campo Alegre	10,43	BC	Chinchiná	21,81	A
Libano	68,38	BCD	Chinchiná	10,40	BC	Montenegro	21,79	A
La Espiga	67,73	BCD	San Simón	10,17	BC	Quindío	21,28	A
Chinchiná	64,79	CD	Perijá	10,10	BC	La Espiga	20,78	A
Montenegro	62,96	CD	Quindío	9,92	C	Parnaso-200	17,97	AB
Paujil	61,95	CD	Suroeste	9,50	C	Paujil	17,72	AB
La Montaña	59,44	D	Salgar	9,41	C	Salgar	17,14	AB
Malabar	53,34	D	La Espiga	9,27	C	La Montaña	16,58	B

Continúa...

...continuación.

Unidad de suelo	Promedio (Ga)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Ge)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (In)	Dif
Suroeste	17,86	A	Siberia	24,06	A	Malabar	1,43	A
Siberia	14,22	B	Suroeste	21,85	AB	Suroeste	1,12	B
La Espiga	12,92	BC	La Espiga	21,84	AB	La Espiga	1,11	B
Montenegro	12,33	BC	La Montaña	21,68	AB	Salgar	1,10	B
Quindío	11,15	CD	Campo Alegre	19,98	AB	Siberia	1,06	B
Chinchiná	11,07	CD	San Simón	19,64	AB	Quindío	1,05	BC
Paujil	9,22	CDE	Libano	19,54	AB	Chinchiná	1,03	BC
San Simón	9,15	CDE	Perijá	19,36	AB	Libano	0,93	CD
Campo Alegre	9,05	CDE	Parnaso-200	18,85	B	San Simón	0,90	D
Salgar	8,15	CDE	Montenegro	18,34	B	Parnaso-200	0,85	DE
Parnaso-200	8,14	DE	Paujil	17,75	BC	Montenegro	0,81	EF
La Montaña	7,71	DE	Salgar	17,49	BCD	Campo Alegre	0,79	EF
Perijá	7,17	DE	Chinchiná	17,27	BCD	Perijá	0,73	EF
Libano	6,28	E	Quindío	14,28	CD	Paujil	0,70	FG
Malabar	2,83	E	Malabar	7,42	D	La Montaña	0,59	G
Unidad de suelo	Promedio (K)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (La)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Li)	Dif
Quindío	1,98	A	Montenegro	18,67	A	Suroeste	2,11	A
Salgar	1,94	AB	Quindío	17,95	AB	Montenegro	1,95	A
La Montaña	1,93	AB	Chinchiná	17,80	AB	Chinchiná	1,84	AB
Malabar	1,93	AB	Campo Alegre	17,31	ABC	Quindío	1,81	AB
La Espiga	1,92	AB	La Espiga	16,41	BC	La Espiga	1,54	ABC
Suroeste	1,90	BC	San Simón	16,19	BC	Malabar	1,38	ABCD
Paujil	1,89	BC	Libano	15,85	BC	Salgar	1,35	BCD
Libano	1,89	BC	Siberia	15,79	C	Siberia	1,33	CD
Chinchiná	1,88	BC	Suroeste	14,78	CD	La Montaña	1,31	CD
San Simón	1,85	BCD	Paujil	14,24	CD	Paujil	1,26	CD

Continúa...

...continuación.

Perijá	1,85	BCD	Parnaso-200	13,29	CD	Campo Alegre	1,18	CD
Parnaso-200	1,83	CD	La Montaña	12,92	CD	Parnaso-200	1,15	CD
Montenegro	1,82	D	Malabar	12,73	CDE	Perijá	1,14	CD
Campo Alegre	1,81	D	Perijá	12,55	DE	San Simón	1,12	D
Siberia	1,67	E	Salgar	9,23	E	Libano	1,12	D
Unidad de suelo	Promedio (Mg)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Mn)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Mo)	Dif
Campo Alegre	1,77	A	Suroeste	25,56	A	La Montaña	37,54	A
La Espiga	1,75	A	Salgar	25,10	A	Malabar	30,78	AB
San Simón	1,71	A	Siberia	23,42	A	La Espiga	29,90	B
Siberia	1,66	AB	Malabar	22,87	AB	Montenegro	28,59	B
Chinchiná	1,64	AB	Chinchiná	19,33	B	Perijá	25,68	B
Malabar	1,63	ABC	La Espiga	18,64	B	Quindío	25,42	B
Quindío	1,63	BC	Parnaso-200	18,48	B	Paujil	22,64	BC
Parnaso-200	1,63	BC	Libano	17,19	BC	Siberia	20,40	BC
Libano	1,58	BC	San Simón	15,71	C	Chinchiná	19,65	BC
La Montaña	1,55	C	Quindío	15,54	CD	San Simón	18,60	BC
Suroeste	1,54	C	Campo Alegre	14,63	CD	Campo Alegre	18,46	BC
Perijá	1,52	C	Paujil	14,54	CDE	Libano	16,48	CD
Montenegro	1,44	C	Perijá	14,04	CDE	Suroeste	13,13	CD
Paujil	1,43	C	Montenegro	13,94	DE	Salgar	13,00	CD
Salgar	1,29	D	La Montaña	12,03	E	Parnaso-200	11,46	D
Unidad de suelo	Promedio (N)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Na)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Ni)	Dif
Malabar	2,34	A	Malabar	79,58	A	Salgar	510,19	A
Quindío	2,17	A	La Espiga	78,00	A	Parnaso-200	443,20	AB
Chinchiná	2,13	AB	Siberia	77,12	A	Suroeste	414,00	BC
Suroeste	2,11	ABC	Montenegro	73,50	A	Chinchiná	387,04	C
Parnaso-200	2,11	ABC	Libano	71,76	A	Perijá	369,93	C

Continúa...

...continuación.

Montenegro	2,09	ABC	Chinchiná	71,57	A	Siberia	356,67	C
Siberia	2,09	ABC	Quindío	71,43	A	Paujil	344,38	CD
Salgar	2,06	ABCD	Paujil	66,92	AB	Quindío	299,78	D
La Montaña	2,02	BCD	Campo Alegre	65,27	AB	San Simón	281,41	D
Libano	2,01	BCD	San Simón	61,99	ABC	Campo Alegre	261,40	D
Paujil	2,00	CD	La Montaña	60,94	ABC	La Espiga	250,39	DE
San Simón	1,98	D	Suroeste	60,47	ABC	Montenegro	234,12	DE
Campo Alegre	1,95	D	Salgar	57,00	BC	Libano	228,13	DE
La Espiga	1,93	D	Parnaso-200	56,10	C	Malabar	224,60	DE
Perijá	1,93	D	Perijá	55,28	C	La Montaña	189,08	E
Unidad de suelo	Promedio (P)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Pb)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Pd)	Dif
Campo Alegre	1,54	A	La Espiga	26,33	A	Campo Alegre	3,27	A
La Espiga	1,50	AB	Paujil	25,92	A	San Simón	2,47	B
Malabar	1,46	ABC	La Montaña	22,54	A	La Montaña	2,39	BC
San Simón	1,45	BC	Siberia	22,38	A	Siberia	1,90	CD
Siberia	1,43	BC	San Simón	20,75	A	Libano	1,50	CDE
Libano	1,43	BC	Montenegro	20,27	A	Perijá	1,43	CDE
Chinchiná	1,41	C	Salgar	19,33	AB	La Espiga	1,28	CDE
Paujil	1,39	CD	Libano	18,95	AB	Montenegro	1,28	CDE
Parnaso-200	1,37	CD	Parnaso-200	18,91	AB	Salgar	1,16	CDE
Quindío	1,36	CD	Perijá	16,91	AB	Parnaso-200	1,11	DE
Perijá	1,33	CD	Campo Alegre	16,75	AB	Chinchiná	1,03	DE
Suroeste	1,32	D	Suroeste	15,94	AB	Suroeste	0,95	DE
Montenegro	1,26	E	Chinchiná	15,61	AB	Quindío	0,93	E
La Montaña	1,25	E	Malabar	15,54	AB	Paujil	0,80	E
Salgar	1,16	F	Quindío	14,42	B	Malabar	0,00	E

Continúa...

...continuación.

Unidad de suelo	Promedio (Pt)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Rb)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (S)	Dif
Suroeste	116,66	A	La Montaña	95,15	A	Salgar	4,84	A
La Espiga	104,53	AB	Montenegro	71,95	B	Suroeste	4,68	A
Campo Alegre	104,29	AB	Quindío	71,14	B	Siberia	4,32	A
Siberia	99,77	B	Paujil	70,27	B	Malabar	4,77	AB
San Simón	95,91	BC	Campo Alegre	58,70	C	La Espiga	3,45	BC
Chinchiná	92,01	BCD	Libano	51,36	CD	Parnaso-200	3,37	C
Montenegro	86,76	BCDE	La Espiga	48,39	D	Chinchiná	3,15	CD
Perijá	84,37	BCDEF	Perijá	48,06	D	Montenegro	3,15	CD
Libano	82,16	CDEF	San Simón	47,76	D	San Simón	3,03	CDE
Salgar	77,87	CDEFG	Suroeste	46,23	DE	Quindío	2,97	CDE
Paujil	77,68	DEFG	Chinchiná	41,76	E	Libano	2,95	CDEF
Parnaso-200	77,43	EFG	Siberia	31,15	E	Paujil	2,88	DEF
Quindío	77,24	EFG	Salgar	30,60	EF	Campo Alegre	2,85	DEF
La Montaña	70,91	FG	Malabar	29,18	EF	La Montaña	2,80	EF
Malabar	44,11	G	Parnaso-200	21,23	F	Perijá	2,44	F
Unidad de suelo	Promedio (Sb)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Se)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Sc)	Dif
Campo Alegre	6,19	A	Quindío	1,98	A	Chinchiná	6,60	A
Siberia	5,81	A	Montenegro	1,82	AB	San Simón	6,51	A
San Simón	5,46	A	La Espiga	1,65	ABC	Campo Alegre	5,98	A
La Espiga	5,41	A	Libano	1,56	BCD	Siberia	5,22	AB
Libano	4,17	AB	Campo Alegre	1,43	CD	Suroeste	4,58	AB
Malabar	3,91	AB	Siberia	1,36	CD	Parnaso-200	4,54	AB
Montenegro	3,49	B	Suroeste	1,24	CDE	Libano	3,92	ABC
Quindío	2,79	BC	San Simón	1,14	DE	Malabar	3,89	ABC
Parnaso-200	2,69	BC	Salgar	1,05	DEF	La Espiga	3,61	BC
Chinchiná	2,17	BCD	La Montaña	0,96	EF	Montenegro	3,36	BC

Continúa...

...continuación.

Salgar	1,95	BCD	Chinchiná	0,95	EF	Quindío	3,01	BC
Suroeste	1,76	CD	Parnaso-200	0,78	F	Paujil	2,83	BC
La Montaña	1,54	CD	Perijá	0,72	F	Perijá	2,56	BC
Paujil	1,39	CD	Paujil	0,62	F	Salgar	2,43	BC
Perijá	0,79	D	Malabar	0,52	F	La Montaña	2,27	C
Unidad de suelo	Promedio (Si)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Sn)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Sr)	Dif
Malabar	20,58	A	Suroeste	385,82	A	Montenegro	17,80	A
Perijá	17,46	AB	Paujil	337,99	AB	Quindío	17,67	A
Paujil	17,28	AB	Perijá	329,37	AB	Malabar	14,41	B
San Simón	15,01	BC	La Montaña	268,47	B	Siberia	13,50	B
Montenegro	14,43	BCD	Chinchiná	267,58	B	La Montaña	12,62	B
Campo Alegre	14,26	BCD	Salgar	266,55	BC	Líbano	12,58	B
Siberia	14,01	CD	Parnaso-200	256,75	BC	Campo Alegre	11,56	BC
Quindío	12,96	CDE	Siberia	242,90	BC	La Espiga	11,34	BCD
Chinchiná	12,89	CDE	Malabar	235,40	BCD	San Simón	10,85	CD
La Montaña	12,69	CDE	Montenegro	227,78	CD	Chinchiná	10,19	DE
Suroeste	12,56	CDE	Quindío	205,52	CD	Salgar	8,65	EF
Líbano	11,51	DE	La Espiga	197,87	CD	Suroeste	8,37	F
Parnaso-200	11,49	DE	San Simón	192,92	CD	Perijá	7,19	F
Salgar	10,93	DE	Líbano	191,87	CD	Paujil	4,47	G
La Espiga	9,83	E	Campo Alegre	168,42	D	Parnaso-200	4,45	G
Unidad de suelo	Promedio (Te)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Ti)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Tl)	Dif
Parnaso-200	28,39	A	Suroeste	259,20	A	Salgar	69,38	A
Suroeste	24,37	AB	Montenegro	258,90	AB	La Espiga	51,29	B
Siberia	20,21	B	Perijá	228,03	AB	Paujil	42,62	BC
San Simón	20,13	B	Malabar	204,39	ABC	Malabar	34,55	BCD
Campo Alegre	20,07	B	La Montaña	200,40	ABC	La Montaña	33,82	CD

Continúa...

...continuación.

Unidad de suelo	Promedio (V)		Dif	Unidad de suelo		Promedio (Zn)		Dif	Suroeste	CD
La Espiga	18,21	BC	Siberia	185,38	ABC	Suroeste	30,33	CD		
Libano	15,32	BC	Campo Alegre	185,24	ABC	Libano	27,50	CD		
Montenegro	14,22	BC	Chinchiná	176,65	ABC	Parnaso-200	24,00	D		
Paujil	10,11	BCD	La Espiga	172,80	ABC	Quindío	23,52	D		
Chinchiná	8,90	BCD	San Simón	156,49	ABC	Siberia	22,92	D		
Malabar	8,77	BCD	Salgar	147,85	ABC	Montenegro	22,74	D		
Quindío	8,14	CD	Libano	128,77	BC	Campo Alegre	21,01	D		
Perijá	4,98	CD	Paujil	128,00	BC	San Simón	20,12	D		
Salgar	4,75	CD	Parnaso-200	117,05	C	Perijá	19,78	D		
La Montaña	4,50	D	La Montaña	116,44	C	Chinchiná	6,95	E		
Unidad de suelo	Promedio (V)	Dif	Unidad de suelo	Promedio (Zn)	Dif					
Suroeste	10,58	A	Siberia	4,81	A					
Campo Alegre	7,95	AB	Campo Alegre	4,62	AB					
Chinchiná	6,91	AB	Malabar	4,38	ABC					
Perijá	5,75	ABC	Libano	4,15	BC					
Parnaso-200	5,25	ABC	San Simón	4,14	BC					
La Espiga	5,02	ABC	Salgar	4,00	BC					
Montenegro	4,59	ABC	Chinchiná	3,89	C					
Libano	4,38	ABC	Paujil	3,80	C					
San Simón	4,31	ABC	Montenegro	3,79	C					
La Montaña	4,15	ABC	Parnaso-200	3,65	CD					
Salgar	3,96	ABC	Perijá	3,59	CD					
Paujil	3,69	ABC	La Espiga	3,58	CD					
Quindío	3,68	BC	Quindío	3,44	CD					
Siberia	2,53	C	Suroeste	3,24	D					
Malabar	0,68	C	La Montaña	2,79	E					

+ Unidades: % N y K; g kg⁻¹, S, Mg, P, Ca; mg kg⁻¹ (ppm) para Na, Rb, Fe, Mn, Si, Sr, Cu, Al, B, Ba, Zn, Li, In; µg kg⁻¹, Ni, Sn, Ti, Co, Pt, Cr, Tl, Mo, Pb, Ge, La, Te, Ce, Ga, Au, As, V, Ag, Se, Sb, Cd, Bi, Pd, Sc, Be. ++ Para cada elemento, letras diferentes entre unidades de suelo indican diferencias significativas Duncan (5%).

Tabla 11. Porcentaje de muestras con ausencia de algunos elementos químicos en el café verde.

Elemento químico	Muestras que no contenían el elemento (%)
Tl	43,2
Pd	38,2
As	30,0
Se	28,2
Bi	24,5
Be	21,0
Sb	20,2
Te	18,1
Au	7,4
Sc	5,2
Ga	4,8
Ge	4,2
Cd	4,2
Ag	4,0
V	2,9
Mo	1,6
Al	1,1
Pb	0,8
La	0,5
Ce	0,3

Tabla 12. Porcentaje de fincas donde no se encontraron algunos elementos químicos en el café verde.

Elemento químico	Fincas donde no se detectó el elemento (%)
Tl	19,2
Pd	13,5
Se	9,0
As	7,7
Sb	7,7
Te	7,1
Bi	5,8
Be	5,1
Au	2,6
Sc	1,3

En el 47,5% de las fincas no se detectó en el grano de café verde al menos uno de los siguientes elementos: As, Be, Tl, Pd, Bi, Sb, Se, Te; en el 9,3% de las fincas no se encontraron dos de estos elementos; y en el 7,4% no se detectaron tres de estos elementos.

Los elementos As, Be, Tl, Pd, Bi, Sb y Se no se detectaron en el café de una finca de Andes Antioquia; seis elementos no se detectaron en dos fincas, una de Caldas y otra del Cesar; y cuatro elementos no se encontraron en el café de dos fincas, una del Cesar y otra de Antioquia. El café que no presentó elementos químicos pesados presenta ventajas de inocuidad y calidad.

En conclusión, el material parental, la unidad de suelos y el rango de altitud fueron los factores que más diferenciaron los contenidos minerales del grano de café.

El Pd parece estar ausente en la región de Quimbaya con unidad de suelo Malabar; el café de esta región también puede asociarse con un alto contenido de Fe. Los granos de café con altos contenidos medios de Rb ($83,4 \text{ mg.kg}^{-1}$) y altas concentraciones de Au ($10,1 \text{ } \mu\text{g.kg}^{-1}$) estarían asociados al café del Cesar.

Hubo diferencias según la altitud en la presencia y contenido de varios elementos químicos en el café, por encima de 1.600 m fueron mayores los contenidos de As, Bi, Cr, In, Mg, Ni, P, Pd, Pt, Sb, Se, Te y Zn en los granos de café; por el contrario, fueron menores los contenidos de Ba, Ca, Cu, K, Li, Mo, Rb, Sc, Sr (Tabla 8).

Las variaciones en las concentraciones de los elementos pesados y los micro-elementos (con niveles de $\mu\text{g.kg}^{-1}$), Tl, Pd, As, Se, Bi, Be, Sb, Te, Au, Sc, Ga, Ge, Cd, Ag, V, Mo, Al, Pb, La y Ce, estuvieron influenciadas por la altitud, el material parental y la unidad

de suelos, y también como se mencionó anteriormente, pueden estar asociadas a las condiciones geográficas, al origen geológico de los suelos cafeteros en cada región, así como a los productos usados para la fertilización y manejo fitosanitario de plagas y enfermedades.

Las diferencias en los contenidos de elementos químicos minerales en el café de Colombia halladas con esta investigación podrían utilizarse como variables químicas de diferenciación del grano de café para su comercialización, destacando otros atributos del café de las regiones.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio de Extensión Rural de Antioquia, Quindío, Huila, Tolima y a las Estaciones de Cenicafé en Santander, Pueblo Bello y Paraguaicito, y a la Cooperativa de Caficultores de Anserma (Caldas). A Diana Marcela Muñoz N., Liliana Moncayo M., Paula Tatiana Miranda A., Kevin Adolfo Hincapié V., Luisa Fernanda Gallego B., Francy Marcela Acosta N. y al doctor Luis Fernando Samper.

Esta investigación hizo parte del proyecto QIN3010 “Estudio de perfiles sensoriales y componentes químicos del café de Colombia para su verificación de origen y calidad”, que se desarrolló en la disciplina de Química Industrial de Cenicafé y se desarrolló con recursos de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

LITERATURA CITADA

1. ÁLVAREZ, M.; MORENO, I.M.; PICHARDO, S.; CAMEAN, A.M.; GONZÁLEZ, A.G. Mineral profile of “fino” wines using inductively coupled plasma optical emission spectrometry methods. *Food chemistry* 135(1):309-313. 2012.
2. ANDERSON, K.A.; SMITH, B.W. Chemical profiling to differentiate geographic growing origins of coffee. *Journal of agricultural and food chemistry* 50(7):2068-2075. 2002.
3. BOWEN, H.J.M. Trace elements in biochemistry. Nueva York : Academic press, 1966. 241 p.
4. CENICAFÉ. Informe anual Cenicafé: 1998-1999. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 163 p.
5. CENICAFÉ. Informe anual Cenicafé: 1999-2000. Chinchiná : Cenicafé, 2000. 161 p.
6. CLARKE, R.J. Coffee: Chemistry. Ámsterdam : Elsevier applied science, 1985. 306 p.
7. CLARKE, R.J.; WALKER, L.J. Potassium and other mineral contents of green, roasted and instant coffees. *Journal of the science of food and agriculture* 25(11):1389-1404. 1974.
8. CLARKE, R.J.; VITZHUM, O.G. Coffee: Recent developments. New Jersey : Wiley Blackwell, 2001. 272 p.
9. DAY, M.P.; ZHANG, B.; MARTIN, G.H. Determination of the geographical origin of wine using joint analysis of elemental and isotopic composition: Differentiation of the principal production zones in France for the 1990 vintage. *Journal of science of food and agriculture* 67(1):113-123.
10. DOWNEY, G.; SPENGLER, B. Compositional analysis of coffee blends by near infrared spectroscopy. *Irish journal of agricultural food research* 35(2):179-188. 1996.
11. ESECHIER, H.A. Distribution of chemical constituents in the plant parts of six tropical-origin forage grasses at early anthesis. *Journal of the science of food and agriculture* 58(3):435-438, 1992.
12. FNC. Nuestras regiones cafeteras. [En línea]. Bogotá: La Federación, [s.f.]. Disponible en internet: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/regiones_cafeteras/. Consultado en junio de 2015.
13. FERREIRA, L.A.B.; FRAGOSO, M.A.C.; PERALTA, M.F.; SILVA, M.C.C.; REBELO, M.C. Constituintes minerais dos cafés de Angola. Paris : ASIC, 1971.
14. FREGA, N.; BOCCI, F.; LERCKER, G. High resolution gas chromatographic method for

- determination of Robusta coffee in commercial blends. *Journal of high resolution chromatography* 17(5):303-307. 1994.
15. ILLY, A.; VIANI, R. Espresso coffee: The science of quality. 2a. ed. Amsterdam : Elsevier, 2005. 398 p.
 16. KABATA P, A. Trace elements in soils and plants. 2a. ed. Boca Raton : CRC press, 1992. 365 p.
 17. KAWAKAMI, Y.; KUNIEDA, S.; SATO, A.; TAKASHIMA, Y.; KANISAWA, T. Studies on volatile compounds in a series of roasted coffee beans: Changes of the amounts of volatile compounds and total sulfur. Paris : ASIC, 1995.
 18. KOTHNY, E.L. Trace elements in the environment. Washington : American chemical society, 1973.
 19. KREJCOVA, A.; CERNOHORSKY, T. The determination of boron in tea and coffee by ICP-AES method. *Food chemistry* 82:303-308. 2003.
 20. KRIVAN, V.; BARTH, P.; MORALES, A.F. Multielemental analysis of green coffee and its possible use for the determination of origin. *Microchimica acta* 110(4/6):217-236. 1993.
 21. LAMBOT, C.; HUSSON, J.; BEDON, L.; GOULOIS, E.; PRIVAT, I.; MICHAUX, S.; BROUN, P. Identification of biochemical and physiological markers related to green coffee under storage: Nestlé R&D center tours. Costa Rica : ASIC, 2012.
 22. MACRAE, R.; PETRACCO, M.; ILLY, E. Trace metal profiles of green coffees. Paris : ASIC, 1993.
 23. MALIK, J.; SZAKOVA, J.; DRABEK, O.; BALIK, J.; KOKOSKA, L. Determination of certain micro and macro elements in plant stimulants and their infusions. *Food chemistry* 111(2):520-525. 2008.
 24. MARTIN, M.J.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A.G. Characterization of Arabica and Robusta roasted coffee varieties and mixture resolution according to their metal content. *Food chemistry* 66:365-370. 1999.
 25. MORGANO, M.A.; PAULUCI, L.F.; MANTOVANI, D.M.B.; MORY, E.E.M. Determinação de minerais em café cru. *Ciência tecnologia alimentos* 22(1):19-23. 2002.
 26. NICHOLAS, D.J.D.; EGAN, A.R. Trace elements in soil plant animal systems. Nueva york : Academic press, 1975. 417 p.
 27. OLESZCZUK, N.; CASTRO, J.C.; SILVA, M.M. DA; GRACAS, M. DAS; KORN, A.; WELZ, B.; VALE, M.G. Method development for the determination of manganese, cobalt and copper in green coffee comparing direct solid sampling electrothermal atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Talanta* 73(5):862-869. 2007.
 28. PAIS, I.; JONES JR., J.B. The handbook of trace elements. Boca raton : St. Lucie press, 1997. 223 p.
 29. PERTOLDI M., G.; PROCIDA, G.; PALO, D. DE; WEBER, A. Characterization of Arabica and Robusta coffee varieties according to their trace heavy metals content. Paris : ASIC, 2001.
 30. POHL,P.;STELMACHE,E.;WELNA,M.;SZYMCZYCHA M., A. Determination of the elemental composition of coffee using instrumental methods. *Food analytical methods* 6(2):598-613. 2013.
 31. PRIETO M., H.E.; POLTRONIERI, Y.; FARAH, A.; PERRONE, D. Zinc supplementation, production and quality of coffee beans. *Ceres* 60(2):293-299. 2013.
 32. PRODOLLIET, J.; ZBINDEN, P.; ANDREY, D.; BAUMGARTNER, M. Determination of the geographical origin of green coffee by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Paris : ASIC, 2001.
 33. PUERTA Q., G.I. Buenas prácticas agrícolas para el café. Chinchiná : Cenicafé, 2006. 12 p. (Avances Técnicos No. 349).
 34. PUERTA Q., G.I. Composición química de una taza de café. Chinchiná : Cenicafé, 2011. 12 p. (Avances Técnicos No. 414).
 35. PUERTA Q., G.I. Contaminantes del café: Seminario presentado en diplomado de evaluación de la calidad del café. Manizales : Universidad Autónoma de Manizales, 2011. 31 diap.
 36. PUERTA Q., G.I. Especificaciones de origen y buena calidad del café de Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 316).
 37. PUERTA Q., G.I. La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. Chinchiná : Cenicafé, 2006. 8 p. (Avances Técnicos No. 352).
 38. PUERTA Q., G.I. Registro de la trazabilidad del café en la finca. Chinchiná : Cenicafé, 2007. 8 p. (Avances Técnicos No. 355).

39. PUERTA Q., G.I.; GONZÁLEZ R., F.O.; CORREA P., A.; ÁLVAREZ L., I.E.; ARDILA C., J.A.; GIRÓN O., O.S.; RAMÍREZ Q., C.J.; BAUTE B., J.E.; SÁNCHEZ A., P.M.; SANTAMARÍA B., M.D.; MONTOYA, D.F. Diagnóstico de la calidad del café según altitud suelos y beneficio en varias regiones de Colombia. *Cenicafé* 67(2):15-51. 2016.
40. QUIJANOR, M.; SPETTEL, B. Análisis instrumental por activación con neutrones térmicos de algunas muestras de café. París : ASIC, 1973.
41. RAGOSO, M.A.C.; FERREIRA, L.A.B.; PERALTA, M.F. Metais pesados em cafês. París : ASIC, 1971.
42. ROFFI, J.; SANTOS, A.C. DOS; MEXIA, J.T.; BUSSON, F.; MAIGROT, M. Cafês verts et torrefies de l'Angola etude chimique. París : ASIC, 1971.
43. SADEGHIAN K., S.; GAONA J., S. El suelo: Formación, fertilidad y conservación: Fundamentos agronómicos. [cd rom]. Chinchiná : Cenicafé : FNC : FMM : SENA, 2005.
44. SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; ARCILA P., J. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 57(4):251-261. 2006.
45. SANTOS, E.J. DOS; OLIVEIRA, E. DE. Determination of mineral nutrients and toxic elements in brazilian soluble coffee by ICP-AES. *Journal of food composition and analysis* 14(5):523-531. 2001.
46. TINKER, P.B. Levels, distribution and chemical forms of trace elements in food plants. *Philosophical transactions of the Royal society of London* 294(1071):41-55. 1981.
47. UNDERWOOD, E.J. Trace elements in human and animal nutrition. 2a. ed. Nueva York : Academic press, 1962. 429 p.
48. VILLARREALP, D.; BERTRAND, B.; LAFFARGUE, A.; POSADA S., H.E.; LASHERMES, P.; DUSSERT, S. Chemometric discrimination of coffee *Coffea arabica* L. genotypes and growing origins. París : ASIC, 2008.
49. YARA. Nutrición vegetal: Café resumen nutricional. [en línea]. Bogotá: YARA, (s.f.). Disponible en internet: <http://www.yara.com.co/crop-nutrition/crops/cafe/informacion-esencial/resumen-nutricional/>. Consultado en enero de 2016.
50. ZAMBRANO F., D.A. Fermente y lave su café en el tanquetina. Chinchiná: Cenicafé, 1993. 8 p. (Avances técnicos No. 197).