



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Veracruz

Subdirección Académica

División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

OFICIO: ITV/DEPI/No.104/2020

A QUIEN CORRESPONDA PRESENTE

Por medio de la presente el que suscribe Dr. Benigno Ortiz Muñiz, Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Veracruz me permito hacer **CONSTAR** que, de acuerdo a los archivos de esta División de Estudios, el (la) **Dr. Oscar González Ríos** fungió como **Director(a)** de la Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica titulada: **"Estudio de la fracción lipídica de dos variedades híbridas de café a diferentes perfiles de temperatura de tostado"** desarrollada por el (la) **C. Samuel de Jesús Ángel Juárez**, número de control **M17020001**.

Se extiende la presente a la Ciudad de Veracruz, Veracruz a los cinco días del mes de marzo del año dos mil veinte.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
Antorcha y Luz de Fuego Permanente*

BENIGNO ORTIZ MUÑIZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.c. Archivo



Calz. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar
C.P. 91897, Veracruz, Ver. Tel. (229) 934 1500

www.veracruz.tecnm.mx



CERTIFICACIÓN DE ACTA DE EXAMEN DE GRADO DE MAESTRÍA



El suscrito Director del Instituto Tecnológico de Veracruz, certifica que en el Libro para Actas de Examen de Grado de Maestría N° 1 autorizado el día 18 del mes de Agosto del 2014 por la Dirección de Servicios Escolares y Estudiantiles de la Dirección General del Tecnológico Nacional de México, se encuentra asentada en la foja número 119 el Acta que a la letra dice: En la H. Veracruz, Veracruz a los 28 días del mes de junio de 2019, siendo las 12:00 horas, se reunieron en el Aula Magna del Instituto Tecnológico de Veracruz, clave 30DIT0002U, el jurado integrado por:

Presidente(a): Doctor en Ciencias de los Alimentos Oscar González Ríos 5691004

Secretario(a): Doctor en Ciencias de Alimentos Víctor José Robles Olvera 4341030

Vocal: Doctor en Ciencia de Alimentos Hugo Sergio García Galindo 3509139

Y de acuerdo con las disposiciones reglamentarias en vigor, se procedió a efectuar el examen de Grado de Maestría a el (la) C. SAMUEL DE JESUS ANGEL JUAREZ, número de control M17020001 aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA BIOQUÍMICA.

Tomando en cuenta el contenido de la TESIS cuyo título es: "Estudio de la fracción lipídica de dos variedades híbridas de café a diferentes perfiles de temperatura de tostado" que fue dirigida por Dr. Oscar González Ríos; Dra. Mirna Leonor Suárez Quiroz; Dr. Zorba Josué Hernández Estrada, una vez concluido el examen oral, dictaminó que fuera APROBADO (A).

El (la) Presidente (a) del jurado le hizo saber a el (la) sustentante el resultado obtenido, el Código de Ética Profesional y le tomó la Protesta de Ley. Dándose por terminado el Acto a las 14:00 horas, y una vez escrita, leída y aprobada, fue firmada para constancia por las personas que en el acto intervinieron, para los efectos legales a que haya lugar se asienta la presente.

Rubrican.

Se extiende esta certificación a los veintiocho días del mes de junio de dos mil diecinueve.

COTEJÓ



Carlos Julián Genis Triana
Jefe del Departamento
de Servicios Escolares



ING. DAVID REYNIER VALDÉS
DIRECTOR



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

H. Veracruz, Ver., **19/junio/2019**
OFICIO No. ITV/DEPI/363/2019
Asunto: Autorización de impresión

**C. SAMUEL DE JESÚS ÁNGEL JUÁREZ
PRESENTE**

Por este conducto se le comunica que su tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica titulada:

"Estudio de la fracción lipídica de dos variedades híbridas de café a diferentes perfiles de temperatura de tostado"

Fue aprobada en su totalidad en cuanto a formato y calidad del contenido a satisfacción del H. Jurado del examen, por lo que está Usted autorizado a editar la presentación definitiva del trabajo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Antorcha y Luz de Fuego Permanente®

EL. H. JURADO

BENIGNO ORTIZ MUÑOZ
JEFE DE LA DIV. EST. POSG. E INVEST.

DR. OSCAR GONZÁLEZ RÍOS
PRESIDENTE



DR. VÍCTOR JOSÉ ROBLES OLVERA
SECRETARIO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DR. HUGO SERGIO GARCÍA GALINDO
VOCAL

DR. ZORBA JOSUÉ HERNÁNDEZ ESTRADA
SUPLENTE

DR. MIRNA LEONOR SUÁREZ QUIROZ
SUPLENTE 2

c. p. Expediente del Estudiante
Archivo





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

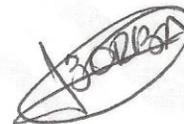
El presente trabajo de tesis titulado **"Estudio de la fracción lipídica de dos variedades híbridas de café a diferentes perfiles de temperatura de tostado"** presentado por el (la) C. **Samuel de Jesús Ángel Juárez** ha sido aprobado por su comité tutorial como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA BIOQUÍMICA

DIRECTOR


DR. OSCAR GONZÁLEZ RÍOS

CO-DIRECTOR



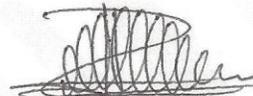
DR. ZORBA JOSUÉ HERNÁNDEZ ESTRADA

CO-DIRECTORA



DRA. MIRNA L. SUÁREZ QUIROZ

REVISOR



DR. VICTOR JOSÉ ROBLES OLVERA

REVISOR



DR. HUGO SERGIO GARCÍA GALINDO

BOM*





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Secretaría de educación pública

**TECNOLOGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Veracruz**

**Estudio de la fracción lipídica de dos variedades
híbridas de café a diferentes perfiles de temperatura
de tostado**

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA BIOQUÍMICA

Presenta:

I.B.Q. Samuel de Jesús Ángel Juárez

Directores:

Dr. Oscar González Ríos

Dra. Mirna L. Suárez Quiroz

Dr. Zorba Josué Hernández Estrada

DEDICATORIA

A nuestro padre por no abandonarme hace más de 27 años y darme esta grandiosa oportunidad. Por abrir mi mente y poner siempre cerca a personas de las cuales puedo aprender cosas tan valiosas.

A mis padres Eustacio y María del Carmen que han pasado una vida de sacrificios donde no existe el cansancio, todo con el fin de que sus hijos se formen como personas de bien y que puedan valerse por sí mismos. Debido a que su mayor temor es el futuro de sus hijos cuando ellos no estén. Es por esto que por medio del presente aprovecho para decirles que nunca voy a poder pagar todo lo que han hecho por mí, pero sí puedo decir que sus sacrificios si están y estarán dando frutos.

A mi familia por su apoyo incondicional en todo lo que hago, principalmente a mis hermanos Daniel y Carmelita que de alguna manera hacen más a menos los días difíciles.

A mis abuelos Octavio y Flora quienes siempre se están preocupando por sus nietos y siempre encuentran la forma de ayudar, ustedes son una gran motivación para mí.

A mis amigos del laboratorio Karen, Casandra, Octavio, Caro, Nadia, mi tocayo, Arturo, Jorge, Gustavo, Hugo, Lucia y Exal; mis amigos de postcosecha Dalia, Chucho, Lucero, Luz, Alaina, Mara y Reina; a Edgar; a mis amigos de generación Alfonso, Ale, Flor y Olga; A mis amigos de servicio social Willy, Fernando, Diego y Juan y también a mis amigos de Lic. Armando, Tellez. Todos ustedes siempre me apoyaron en todo lo que pudieron, lo cual agradezco mucho.

RECONOCIMIENTOS

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (CONACYT) que hizo posible la realización de este proyecto por medio de su financiamiento

A la Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos (UNIDA) del Instituto Tecnológico de Veracruz por formar a los futuros investigadores y profesionistas que desarrollaran la Ciencia y Tecnología que sustentara al país.

A mis Directores de tesis: Dr. Oscar González Ríos, Dr. Zorba Josué Hernández Estrada y Dra. Mirna L. Suárez Quiroz por brindarme su conocimiento, experiencia y confianza para la realización del presente proyecto.

A mi comité revisor: Dr. Hugo Sergio García Galindo y Dr. Víctor Robles Olvera que aportaron sugerencias y correcciones al presente trabajo para su enriquecimiento y correcta culminación.

Un especial agradecimiento a la Dra. Claudia Yuritzi Figueroa Hernández por las aportaciones sugeridas para enriquecer este proyecto.

A la M. C. En Ing. Bioquímica Ana Karen Ramírez Hernández por siempre brindar aportaciones valiosas en el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN

Ángel Juárez, Samuel de Jesús. M en C. Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos. Instituto Tecnológico de Veracruz. Junio del 2019. Estudio de la fracción lipídica de dos variedades híbridas de café a diferentes perfiles de temperatura. Asesores: Dr. Oscar González Ríos, Dra. Mirna Leonor Suárez Quiroz, Dr. Zorba Josué Hernández Estrada.

En el 2015 las variedades híbridas de café “Mundo Mex” (H15) y “Mundo Maya” (H16) fueron introducidas en México sin contar con información del efecto del tostado de granos sobre su contenido de ácidos grasos y diterpenos. Por lo que el principal objetivo del presente trabajo fue evaluar el impacto de 9 tratamientos térmicos de tostado, sobre el perfil lipídico de las variedades híbridas H15 y H16. La metodología aplicada para obtenerlo consistió en tres etapas: 1) cosecha y beneficiado húmedo de la cereza de café hasta café verde de las variedades H15, H16 y Costa Rica como testigo; 2) Estudio de la fracción lipídica, (contenido de lípidos totales, ácidos grasos y cafestol) en café verde y; 3) Aplicación de 9 tratamientos térmicos al café verde, considerando las temperaturas de precalentamiento (T_p), cambio de flama (T_c) y final (T_f), en el proceso de tostado en tambor rotatorio. Los resultados obtenidos en café verde de las variedades de estudio, mostraron que el contenido de lípidos totales fue de: H15 (7.34 %), H16 (7.8 %,) y Costa Rica (9.42 %); El perfil de ácidos grasos fue palmítico (C16:0 = 33.5 %), esteárico (C18:0=6 %), oleíco (C18:1=7 %), araquídico (C20:0=2.3 %), linolénico (C18:3=1 %), behénico (C22:0=0.7 %) y lignocérico (C24:0=0.32 %). La fracción relativa del ácido linoleico fue de 47 % para H15, 49 % para Costa Rica y 50 % para H16, el contenido de cafestol en H15 (1066.64 mg/100 g), H16 (809.32 mg/100 g) y Costa Rica (1023.2 mg/100 g).

Se observó un aumento de la fracción relativa correspondiente a C16:0 (33 a 36%) y disminución de C18:2 (49 a 45%) de café verde a café tostado, mientras que el contenido de ácidos grasos se vio influenciado principalmente por la intensidad de flama alta. La disminución del contenido de cafestol fue mayor en los tostados oscuros (966 a 292 mg/100 g) que en los tostados claros (966 a 461 mg/100 g). De acuerdo a

lo anterior se concluye que la variedad y el tratamiento térmico tienen efecto sobre el contenido total de lípidos, ácidos grasos y cafestol del grano de café.

ABSTRACT

Ángel Juárez, Samuel de Jesús. M en C. Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos. Instituto Tecnológico de Veracruz. June 2019. Study of the lipid fraction of two hybrid varieties of coffee at different temperature profiles. Tutors: Dr. Oscar González Ríos, Dra. Mirna Leonor Suarez Quiroz, Dr. Zorba Josué Hernández Estrada.

In 2015 the coffee hybrid varieties "Mundo Mex" (H15) and "Mundo Maya" (H16) were introduced in Mexico without having information on the effect of roasting of grains on their content of fatty acids and diterpenes. Therefore, the main aim of this work was to evaluate the impact of nine thermal roasting treatments on the lipid profile of the hybrid varieties H15 and H16. The methodology applied to obtain it consisted of three stages: 1) Harvesting and wet processing of the coffee cherry to green coffee for the varieties H15, H16 using Costa Rica variety as a control; 2) Study of the lipid fraction (content of total lipids, fatty acids, and cafestol) in green coffee and; 3) Application of nine thermal treatments to green coffee, considering the temperatures of preheating (T_p), change of flame (T_c) and final (T_f), in the process of roasting in rotating drum. The results obtained in green coffee of the study varieties showed that the total lipid content was: H15 (7.34%), H16 (7.8%), and Costa Rica (9.42%); The fatty acid profile was palmitic (C16: 0 = 33.5%), stearic (C18: 0 = 6%), oleic (C18: 1 = 7%), arachidic (C20: 0 = 2.3%), linolenic (C18: 3 = 1%), behenic (C22: 0 = 0.7%) and lignoceric (C24: 0 = 0.32%). The relative fraction of linoleic acid was 47% for H15, 49% for Costa Rica and 50% for H16, the content of cafestol in H15 (1066.64 mg / 100 g), H16 (809.32 mg / 100 g) and Costa Rica (1023.2 mg / 100 g). An increase of the relative fraction corresponding to C16:0 (33 to 36%) was observed and decrease of C18:2 (49 to 45%) of green coffee to roasted coffee, while the content of fatty acids was influenced mainly by the intensity of the high flame. The decrease in the content of cafestol was higher in dark roasts (966 to 292 mg/ 100 g) than in light roasts (966 to 461 mg/100 g). According to the above, it is concluded that the variety and the heat treatment affect the total lipid, fatty acid, and cafestol content of the coffee bean.

CONTENIDO

RESUMEN	ii
ABSTRACT	vi
CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. El café	3
2.2. Consumo mundial, producción y cambio de existencias	4
2.3. Principales causas del déficit	5
2.3.1. La roya del cafeto	6
2.3.2. La plaga de la broca del fruto de café	7
2.4. Mejoramiento genético de variedades de café	8
2.5. Introducción de variedades híbridas de café en México	10
2.6. Factores que impactan la calidad sensorial en la taza del café	11
2.6.1. Variedad	12
2.6.2. Procesamiento	12
2.6.3. Tostado	12
2.6.4. Molido	12
2.6.5. Bebida de café a base de distintos tipos de granos	13
2.6.6. Preparación de la bebida	13
2.6.7. Composición del grano de café	14
2.6.7.1. Contenido de Lípidos en el grano de café	15
2.7. Fracción lipídica del grano de café	16
2.7.1. Ácidos grasos en el grano de café verde y tostado	17
2.7.2. Diterpenos en el grano de café verde y tostado	19
3. JUSTIFICACIÓN	22
4. HIPOTESIS	23
5. OBJETIVOS	24

5.1. General	24
5.2. Específicos.....	24
6. METODOLOGÍA.....	25
6.1. Material biológico	26
6.2. Beneficiado vía húmeda de café	27
6.2.1. Beneficio húmedo	27
6.2.1.1. Recepción.....	27
6.2.1.2. Lavado y Despulpado.....	27
6.2.1.3. Fermentación.....	28
6.2.1.4. Flotación y lavado	29
6.2.1.5. Secado.....	29
6.2.2. Beneficiado seco de café	30
6.3. Tostado del grano de café	31
6.4. Molienda del café verde y tostado	33
6.5. Obtención de extracto etéreo.....	33
6.6. Determinación del perfil de ácidos grasos en café verde y tostado	33
6.7. Determinación de cafestol en el café verde y tostado	35
6.8. Análisis estadístico de la fracción lipídica del grano de café.....	37
7. Resultados y discusión	38
7.1. Beneficio vía húmeda de café.....	38
7.1.1. Beneficio húmedo de café	38
7.1.2. Beneficio seco de café.....	41
7.1.2.1. Propiedades físicas del grano de café verde.....	42
7.2. Composición Química.....	45
7.2.1. Contenido de humedad del café verde.....	45
7.2.2. Contenido de lípidos en el grano de café verde	46
7.2.3. Contenido de ácidos grasos esterificados en el grano de café verde.....	47
7.2.4. Contenido de cafestol en café verde.....	49
7.3. Tostado del grano de café	50
7.4. Efecto del tostado en la fracción lipídica del grano de café.....	58
8. Conclusiones.....	65
9. Recomendaciones	67

REFERENCIAS.....68

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. Características de los híbridos H15 y H16	11
TABLA 2.2. Composición de lípidos del aceite de café verde	16
TABLA 2.3. Ácidos grasos en triacilglicéridos de grano de café verde (%)	17
TABLA 2.4. Ácidos grasos en triacilglicéridos de grano de café arábica tostado (%)18	
TABLA 2.5. Contenido de cafestol y kahweol (mg/100 g de café verde) de diferentes cultivos en la cosecha 2009 y 2010.....	20
TABLA 2.6. Contenido de cafestol y kahweol (mg/100 g de café tostado) de diferentes cultivos en la cosecha 2009 y 2010.....	21
TABLA 6.1. Variedades de estudio.....	26
TABLA 6.2. Temperaturas empleadas en el proceso de tostado	31
TABLA 6.3. Tratamientos térmicos empleados en el tostado	32
TABLA 6.4. Orden de tostado por variedad.....	32
TABLA 7.1. Rendimientos de las etapas en el beneficiado.	38
TABLA 7.2. Seguimiento de la fermentación.....	39
TABLA 7.3. Rendimiento del Trillado de café.....	41
TABLA 7.4. Granulometría del grano de café verde.....	42
TABLA 7.5. Densidad del grano de café verde.....	42
TABLA 7.6. Parámetros de color del grano de café verde.....	43
TABLA 7.7. Defectos físicos en café verde de la variedad Costa Rica.	43
TABLA 7.8. Defectos físicos en café verde de la variedad H15.	44
TABLA 7.9. Defectos físicos en café verde de la variedad H16.	45
TABLA 7.10. Perfil de ácidos grasos de las variedades de estudio en café verde... ..	48
TABLA 7.11. Contenido de ácidos grasos esterificados en café verde.	49
TABLA 7.12. Tratamientos térmicos agrupados de acuerdo a la temperatura aplicada.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Producción y consumo mundial de café 2013-2016.	4
FIGURA 2.2. Cambios de stocks mundiales 2013-2017.	5
FIGURA 2.3. Patogénesis de <i>H. vastatrix</i>	7
FIGURA 2.4. Adulto de broca.	8
FIGURA 2.5. Estructura molecular de los diterpenos cafestol y kahweol.	19
FIGURA 6.1. Diagrama de flujo general.	25
FIGURA 6.2. Recepción de café cereza.	27
FIGURA 6.3 Despulpado de la cereza de café.	28
FIGURA 6.4 Fermentación del grano de café mucilago.	28
FIGURA 6. 5. Lavado del grano fermentación del grano de café.	29
FIGURA 6. 6. Secado al sol del grano de café pergamino.	29
FIGURA 6.7 Soxhtec System HT 1043.	33
FIGURA 6.8 Diagrama de transesterificación alcalina de ácidos grasos	34
FIGURA 6.9 Cromatógrafo de gases	35
FIGURA 6.10 Diagrama de flujo de la saponificación del extracto etéreo de café verde o tostado.	36
FIGURA 6.11. Cromatógrafo de líquidos de alta eficacia.	37
FIGURA 7.1. Evolución del pH en la fermentación.	39
FIGURA 7.2. Seguimiento de la T y %HR del aire ambiental en el secado.	40
FIGURA 7.3 Rendimiento global del beneficiado de café de la variedad Costa Rica, H15 y H16.	41
FIGURA 7.4. Contenido de humedad del grano de café verde.	46
FIGURA 7.5. Contenido de lípidos totales en el grano de café verde.	46
FIGURA 7.6. Cromatograma de los ácidos grasos esterificados en grano de café verde en cromatografía de gases empleando como estándar interno ácido tridecanoico.	47
FIGURA 7.7. Contenido de cafestol en las variedades de estudio.	50
FIGURA 7.8. Pérdida de masa de cada variedad por el proceso de tostado.	50
FIGURA 7.9. Aumento de volumen en el proceso de tostado.	51
FIGURA 7.10. Efecto del tratamiento térmico en el tostado sobre el parámetro L* .	52

FIGURA 7.11. Efecto del tratamiento térmico sobre el parámetro a^*	53
FIGURA 7.12. Efecto del tratamiento térmico sobre el parámetro b^*	53
FIGURA 7.13. Efecto del perfil de temperatura sobre el parámetro C^*	54
FIGURA 7.14. Efecto del tratamiento térmico sobre el parámetro h^*	55
FIGURA 7.15. Tiempo de tostado de acuerdo al perfil de temperatura.	57
FIGURA 7.16. Condiciones climatológicas en el proceso de tostado.	58
FIGURA 7.17. Efecto del tratamiento térmico en el contenido de lípidos del café. ...	59
FIGURA 7.18. Efecto del tratamiento térmico sobre el perfil de ácidos grasos.....	59
FIGURA 7.19. Efecto del tratamiento térmico en el contenido de ácidos grasos esterificados.....	61
FIGURA 7.20. Efecto del tratamiento térmico en el contenido de ácidos grasos esterificados.....	63
FIGURA 7.21. Efecto del tratamiento térmico en el tostado sobre el contenido de cafestol.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

%	Porcentaje
%AV	Porcentaje de aumento de volumen
%H	Porcentaje de humedad
%PM	Porcentaje de pérdida de masa
°C	Grados Celsius
µL	Microlitros
A	Intensidad de flama alta
a*	Coordenadas rojo a verde
B	Intensidad de flama baja
b*	Coordenadas amarillo a azul
b.s.	Base seca
C*	Cromaticidad
C13:0	Ácido Tridecanoico
C16:0	Ácido palmítico
C18:0	Ácido esteárico
C18:1	Ácido oleico
C18:2	Ácido linoleico
C18:3	Ácido linolénico
C20:0	Ácido araquidónico
C22:0	Ácido behénico
C24:0	Ácido lignocérico
cv	Café verde
D	Grado de tostado oscuro
FID	Flame Ionization Detector
g	Gramos
h	Horas
h*	Hue angulo matiz
ICO	International Coffe Organization
kg	Kilogramos

L	Litros
L*	Luminosidad
LM	Grado de tostado claro medio
m	Metros
M	Intensidad de flama media
m.sn.m.	Metros sobre el Nivel del Mar
MD	Grado de tostado medio oscuro
mg	Miligramos
min	Minutos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
mV	Milivoltios
N	North
nm	Nanómetros
p/p	Relación peso/peso
pH	Potencial de iones hidrógeno
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
s.s.	Solido seco
Tc	Temperatura de cambio de flama
Tf	Temperatura final
Tp	Temperatura de precalentamiento
v/v	Relación volumen/volumen
VOC's	Volatile Organic Compounds
W	West
WCR	Worl Coffee Research

1. INTRODUCCION

El café pertenece a la familia de las Rubiáceas y al género *Coffea*, el cual proviene del continente africano. Este género está conformado aproximadamente por 100 especies, de las cuales *Coffea arabica* es la que tiene un mayor impacto comercial (Davis *et al.*, 2006 y Alvarado y Rojas, 2007). En los periodos 2013/14, 2014/15 y 2015/2016, la producción mundial de café ha mostrado un déficit, lo cual provocó que se consumieran las reservas de café para satisfacer la demanda de café por el mercado. Las causas del déficit fue el cambio climático; el ataque de enfermedades como la roya la cual provoca el desprendimiento de las hojas y la posterior muerte del cafeto y el ataque por plagas como la broca del café (*Hypothenemus hampei*) que afecta tanto a la cereza de café madura y verde a las que perfora, y consume, lo que, las hace vulnerables al ataque por plagas y enfermedades (Cárdenas *et al.*, 2007; Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2016; International Coffee Organization, 2017;).

Debido a esto, la organización internacional del café ICO en el 2013, consideró la renovación de los cultivos cafetaleros con nuevas plantaciones resistentes a plagas, enfermedades y otras características deseables (World Coffee Research WCR, 2016). Posteriormente, en el 2015 fueron introducidas a México 2 nuevas variedades híbridas: el híbrido “Mundo Maya” y “Mundo Mex” los cuales por presentar características de precocidad, producirán en el periodo 2017/2018 su primer cosecha.

Por otro lado, el sabor es de gran importancia en la determinación de la calidad de la bebida de café y está influenciado por diversos factores como la genética, ubicación geográfica del cultivo, clima, prácticas agrícolas, variaciones del procesamiento y método de elaboración de la bebida. El tostado es la etapa en la que se genera una gran cantidad de compuestos que le dan el sabor y aroma característico de una taza de café, los cuales se forman a partir de las reacciones de Maillard; degradación de Strecker; descomposición de aminoácidos, lípidos, entre otros. Dentro de esta composición, la fracción lipídica es de suma importancia, puesto que es la responsable de la presencia del atributo cuerpo que atrapa y

transporta los compuestos volátiles a través de la bebida de café (Bhumiratana *et al.*, 2011 y Sunarharum *et al.*, 2014).

La fracción lipídica es la responsable del atributo cuerpo en la taza de café y también aumenta el atributo calidad aromática, debido a que esta contiene compuestos volátiles liposolubles entre los cuales se encuentran los furanos, pirazinas y cetonas que han demostrado tener alto impacto en la calidad de la taza de café (González-Ríos *et al.*, 2007; González y González, 2011; Sunarharum *et al.*, 2014; Hurtado-Benavides *et al.*, 2016).

Al momento, no se encontraron estudios de la influencia del perfil de temperatura empleado en el tostado, sobre la fracción de ácidos grasos del aceite de café de los híbridos Mundo Maya, Mundo Mex y de la variedad Costa Rica, así como el efecto que tendrá sobre la calidad en taza.

2. ANTECEDENTES

2.1. El café

El café es originario del continente africano, pertenece a la familia de las Rubiaceas y el género *Coffea* con 103 especies, de las cuales solo tres son comerciales y su importancia en este ámbito es de la siguiente manera: *Coffea arabica* L., *C. canephora* y *C. liberica*, teniendo la siguiente taxonomía (Davis *et al.*, 2006 y Alvarado y Rojas, 2007;):

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyla*

Sub-división: *Angiospermae*

Clase: *Magnoliopsida*

Sub-clase: *Asteridae*

Orden: *Rubiales*

Familia: *Rubiaceae*

Género: *Coffea*

Especie: *arabica*,
canephora, *liberica*, etc.

La especie con mayor impacto comercial es *Coffea arabica*, la cual se originó en Etiopia y Sudan, en el continente Africano a una altitud aproximada de 1000 m.s.n.m. Los persas y árabes lo comercializaron en Arabia y Yemen en los años 575 y 890, mientras era distribuido por los nativos africanos en Mozambique y Madagascar. Posteriormente los holandeses y portugueses lo transportaron a Ceylan durante los años 1600 y 1700, para después ser llevados a Java, India y extenderse en otras regiones de Asia y África. En 1708 el gobernador de Java, Von Horn obsequió al rey de Francia Luis XIV una planta de café que fue cultivada en invernaderos en París, donde se multiplicaron y fueron enviadas a la Guyana Francesa, África Ecuatorial, Haití y Santo Domingo en 1727, misma época en la que se distribuyó a través de Sumatra a Brasil, Perú y Paraguay. Una vez en el continente americano el café se extendió a Puerto Rico y El Salvador en 1740 a

Guatemala en 1750 a Bolivia, Ecuador y Panamá en 1784 y finalmente llegó a Costa Rica, a través de Cuba y Guatemala entre los años 1796 y 1798 (Alvarado y Rojas, 2007).

2.2. Consumo mundial, producción y cambio de existencias

En el periodo 2016/17, se registró un aumento de 1.5% veces la producción mundial de café del año 2015/16, registrando 153.9 millones de sacos comercializados, lo cual corresponde a un aumento en la producción de *C. arabica* del 10.2% (97.3 millones de sacos), mientras que la variedad robusta disminuyó un 10.6% (10.6 millones de sacos). Mientras que el consumo se ha mantenido considerablemente estable (FIGURA 2.1) (ICO, 2017).

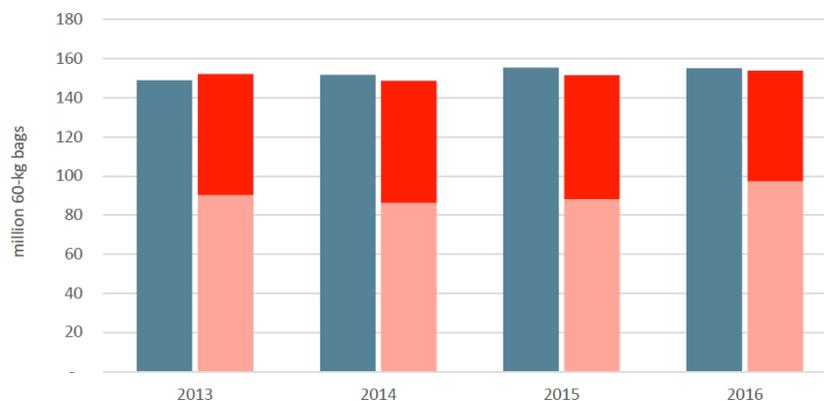


FIGURA 2. 1. Producción y consumo mundial de café 2013-2016.

Donde se muestra el consumo de café (barras grises), producción de café Robusta (barras rojas) y producción de café variedad arabica (barras naranja).

(ICO, 2017).

Por otro lado, a pesar del ligero aumento en la producción mundial, en el periodo 2015/16 el consumo superó la producción con 1.2 millones de sacos por tercer año consecutivo (FIGURA 2.2), lo que provoco una alza en las exportaciones, pero solo durante los primeros 11 meses del “año cafetero” ya que al final del año se mantuvieron similares al periodo anterior, puesto que aun los principales países productores estuvieron obligados a recurrir a las existencias excedentes acumuladas del periodo 2012/13 y 2013/14. Sin embargo, se prevé que esto solo mantendrá estable el suministro de café al mercado a corto plazo (CIO, 2017).

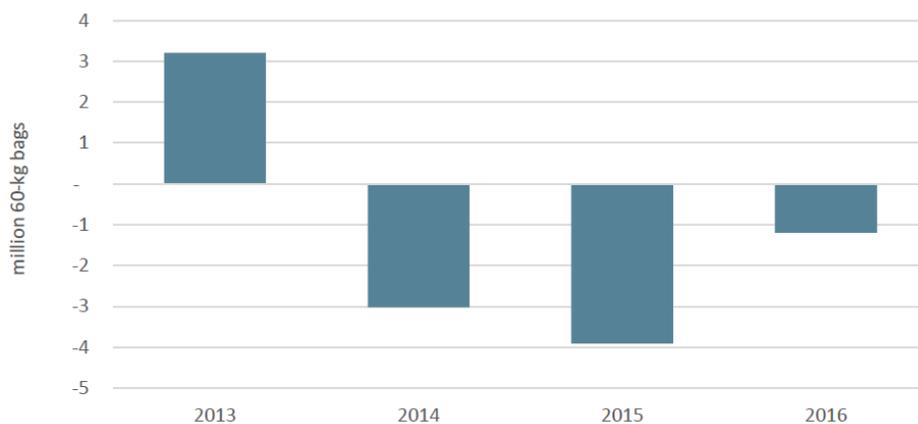


FIGURA 2.2. Cambios de stocks mundiales 2013-2017.
(ICO, 2017).

2.3. Principales causas del déficit

La principal causa de las pérdidas de producción de café, es el cambio climático, a lo que se le suma el ataque de enfermedades o plagas sobre el cafeto. Se tiene que en el 2013 se perdieron por 2.7 millones de sacos de café por la roya del cafeto y que en el periodo actual 2017/2018 Brasil se enfrenta a rendimientos de producción bajos, debido a la prohibición del insecticida endosulfán, lo que ha generado que aproximadamente un 30% de la cosecha sea atacada por la enfermedad de la broca del fruto del café (ICO, 2017).

2.3.1. La roya del cafeto

La roya es la enfermedad del cafeto causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, este se hospeda en diferentes especies del género *Coffea* spp. como *Coffea arabica*, *C. canephora* y *C. liberica*, las cuales infecta mediante la producción de urediniósporas dispersándose a través del viento o la lluvia, por la cercanía entre plantas, presencia de moscas o insectos, incluso provocada por la acción humana (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2016).

H. vastatrix se multiplica a los 30 días del término de la etapa de infección y colonización del tejido de las hojas, formando poros y produciendo nuevas urediniósporas que al ser transportadas por alguno de los factores de dispersión mencionados anteriormente, infecta a otra planta de cafeto (FIGURA 2.3). Esto se refleja en manchas pálidas en el envés de las hojas que aumentan de tamaño, forman esporas que serán germinadas en condiciones ambientales de por lo menos 6 horas de exposición a agua, a 21-25 °C y condiciones de sombra. Posteriormente penetra la hoja a través de los estomas y desarrolla haustorios, los cuales extraen nutrientes de las células. Esto impide la fotosíntesis que al lograr un 60% de daño a la hoja provoca su desprendimiento hasta provocar el completo deshoje del cafeto y provocar la muerte de la planta (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2016).

Se ha reportado la presencia en la mayoría de los países productores de café y en México en los estados de: Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero, Hidalgo, Nayarit, San Luis Potosí, Jalisco, Colima, Tabasco, Estado de México, Querétaro, Morelos y Michoacán. Sumando un 80% de la superficie de cultivo, por los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2016).

ANTECEDENTES

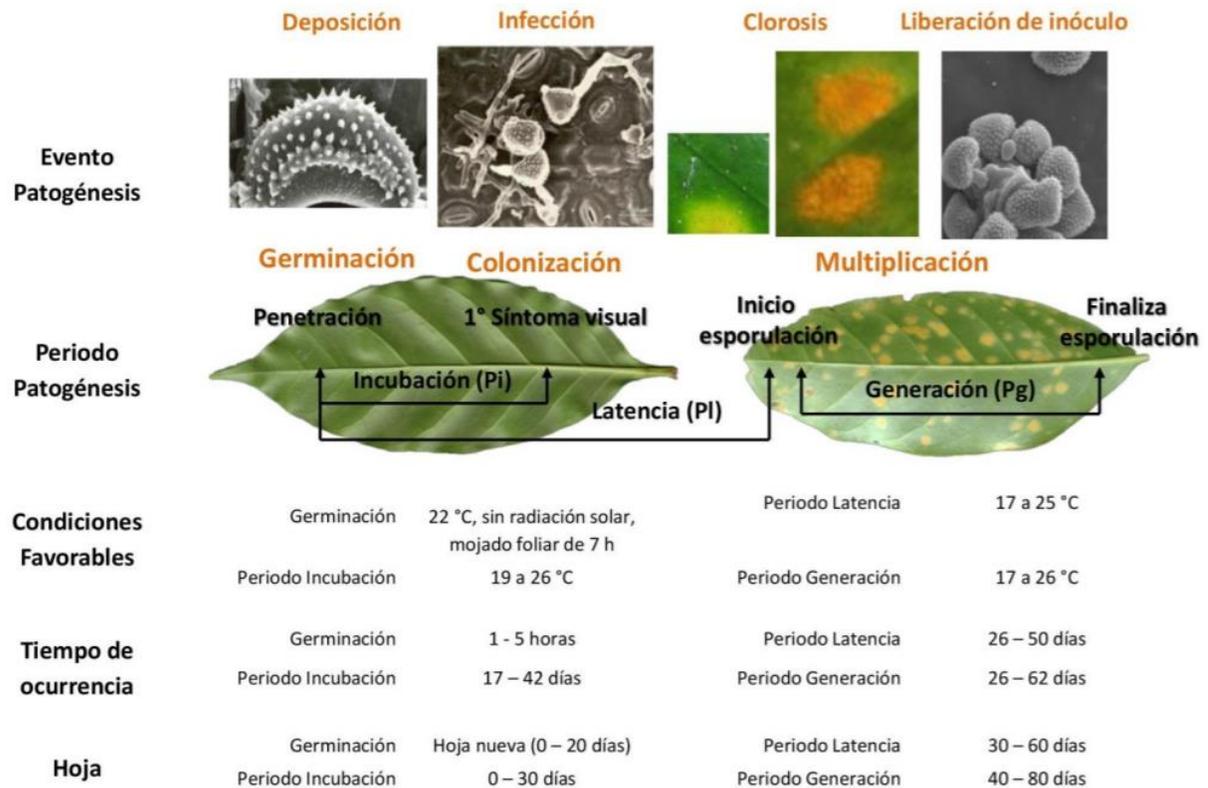


FIGURA 2.3. Patogénesis de *H. vastatrix*.

(Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2016. Crédito: Gabriela Calderón, 2012).

2.3.2. La plaga de la broca del fruto de café

La plaga que causa mayor número de pérdidas en los cultivos cafetaleros es *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Curculionidae) “broca del café” (FIGURA 2.4) llamada así, debido a que la hembra adulta taladra y anida en el endospermo del grano de café, donde produce daños del tipo: perforación, consumo del grano; aumento de la vulnerabilidad a la infestación de plagas y por último al no existir granos maduros la broca ataca también a los granos verdes provocando la caída de estos, aunque en los granos verdes ya no se reproduce esta plaga (Cárdenas *et al.*, 2007).

ANTECEDENTES

Una vez infestado el grano de café, la broca se desarrolla y reproduce en éste en un periodo de 57 días, de los cuales los primeros 12 días es la etapa en la que la broca se encuentra en forma de huevo, donde los primeros huevecillos se desarrollan a los 6 días; del día 18 al 35 está en fase larvaria; en el día 45 en forma de pupa, a partir del día 52 se encuentra en su fase adulta y a los 78 días infesta frutos cercanos (Cárdenas *et al*, 2007).



FIGURA 2.4. Adulto de broca.
(Cárdenas *et al.*, 2007).

2.4. Mejoramiento genético de variedades de café

La International Coffee Organization desde el 2013 ha considerado que el intercambio de plantaciones susceptibles a la roya de café y plagas, por variedades resistentes, es un factor clave para la erradicación de la roya y la disminución de las bajas de producción. Por lo que consideró la colaboración con instituciones especializadas como el Instituto de Investigación Tropical, particularmente con el centro de Investigación de la Roya del Café. Del mismo modo, plantea la importancia de darle un seguimiento a estas nuevas variedades resistentes, puesto que los resultados esperados varían en ocasiones (ICO, 2017).

ANTECEDENTES

El enriquecimiento de la diversidad genética de las variedades de café, es el método por el cual estas adquieren gradualmente características de resistencia a patógenos y aumentan la capacidad de producción. Se han creado nuevos híbridos, para obtener características deseables como altos rendimientos, tamaño pequeño, tamaño del grano, calidad en taza, contenido de cafeína, resistencia a enfermedades, entre otras características; como lo es el híbrido de timor que es la cruce entre el cafeto de la especie arábica y robusta; la cruce de la variedad caturra y el híbrido de Timor que origina el híbrido Catimor, el cual es resistente a la roya; el híbrido Ruiru 11 que presenta resistencia a enfermedades y hongos que atacan a la cereza del café, es enano y tiene altos rendimientos de producción y también el híbrido Icatu que fue originado por la cruce de híbridos arábigos y robustas (Mundo Novo y Caturra) (Muñoz-Sánchez y Hernández-Sotomayor, 2008).

Las técnicas usadas en la crianza de café según Muñoz-Sánchez y Hernández-Sotomayor, (2008) son:

a) Polinización controlada y multiplicación de semillas: es el método de crianza convencional y se lleva a cabo mediante una secuencia de pasos que consisten en seleccionar la población salvaje, hibridación, evaluación de la progenie, retro-cruzamiento y cruces inter-específicas. Este método proporciona nuevos cultivos en más de 30 años.

b) Propagación vegetativa: la propagación vegetativa hortícola, aún no se ha realizado con éxito para la crianza de *C. arabica*, debido a la dificultad para obtener tasas de multiplicación satisfactorias.

c) Cultivo de injertos: este método se ha hecho inseguro para la crianza comercial, ya que el uso de injertos promueve la propagación de enfermedades.

d) Métodos de cultivo de tejidos:

- **Micropropagación:** es realizado a partir de un explanto de una planta seleccionada y es cultivado *in vitro* en condiciones controladas para dar origen a nuevas plantas (clones).

- **Embriogénesis somática:** esta se puede dar de manera natural (sexual: cigótica) o mediante la inducción de células vegetales

para formar embriones en cultivo de tejido. En este tipo de reproducción la nueva planta tiene exactamente la misma información genética que el padre.

- **Manipulación genética:** es el intercambio de material genético, debido a su extracción por la aplicación de radiación para seleccionar los rasgos de progenie deseados e introducirlos al genoma de la planta deseada usando algunas técnicas como la microinyección, electroporación y borbadeo de microproyectil.

2.5. Introducción de variedades híbridas de café en México

Debido a “la crisis de la roya 2012” y las pérdidas en producción de café, se puso a disposición de Mesoamérica y El Caribe en el 2016, el Catálogo de café de la especie *Coffea arabica*. Este reúne información de las 33 variedades presentes en la región, dentro de las cuales hay presencia de nuevos híbridos resistentes a plagas y enfermedades. Además presentan características deseadas como: alta calidad en taza, alto potencial de producción, tamaño de grano grande, precocidad, entre otras. Las variedades que se presentan en el catálogo son: tradicionales en América, locales de Etiópe, de introgresión (Catimor/Sarchimor) e híbridos F1 (World Coffee Research, 2016).

En el 2015 dos híbridos fueron introducidos al territorio mexicano, en el estado de Veracruz, municipio de Huatusco. Donde son actualmente cultivados en la finca Los Tecolotes (19°10'23.3"N; 96°57'08.4"W a 1350 MSNM) y en el periodo 2017/18 producirán su primer cosecha. Estos híbridos provienen de la cruce de un Sarchimor T5296 y un ET01 (Mundo Maya H16) y de la cruce de un híbrido de Timor y un ET26 (Mundo Mex H15) (TABLA 2.1).

TABLA 2.1. Características de los híbridos H15 y H16

Mundo Mex (H 15) Descripción genética TimorxET26	Mundo Maya (H 16) Descripción genética Sarchimor T5296 x ET01
Muy buena calidad en taza Altos rendimientos Enanos Altitud óptima: 1200 Susceptible a la Roya susceptible a nematodos Tolerante a antracnosis de la cereza Precoz Altos requerimientos nutricionales Frutos grandes Brote de las hojas verde	Muy buena calidad en taza Altos rendimientos Enanos Altitud óptima: 800-1500 Resistente a la Roya Tolerante a nematodos Tolerante a antracnosis de la cereza Precoz Altos requerimientos nutricionales Frutos grandes Brote de las hojas bronce

(WCR, 2016).

2.6. Factores que impactan la calidad sensorial en la taza del café

El sabor/aroma es determinante para el consumidor de café, ya que esto le da información sobre la calidad del café que está ingiriendo. Este se ve influenciado de acuerdo a la cepa genética, ubicación geográfica, clima, prácticas agrícolas, variaciones del método de procesamiento (tostado, molienda) y método de elaboración de la bebida (Bhumiratana *et al.*, 2011 y Sunarharum *et al.*, 2014).

Los atributos aromáticos varían de acuerdo a la etapa del procesamiento, variando de acuerdo a la variedad y origen, en el tostado, molido y en la bebida de café (Bhumiratana *et al.*, 2011 y Sunarharum *et al.*, 2014).

2.6.1. Variedad

Se tiene que la variedad de café tiene un efecto en los atributos aromáticos, ya que el grano de café Kona Hawaii presenta atributos aromáticos dulces, aun en tostados oscuros; mientras que granos de café Borbón mostraron poca diferencia entre un tostado claro y oscuro (Bhumiratana *et al.*, 2011).

2.6.2. Procesamiento

Existen 3 vías de procesamiento que son: la húmeda, seca o semi-seca, teniendo que en el procesamiento por la vía húmeda, proporciona con menor cuerpo, mayor acidez y mayor intensidad aromática que el provisto por la vía seca que presenta un café “duro y con sabor medicinal”. Por otro lado, el café obtenido por la vía semi-seca brinda un café con cuerpo intermedio entre las dos vías anteriores (Bhumiratana *et al.*, 2011).

2.6.3. Tostado

El impacto del tostado es debido a la degradación, formación y liberación de una gran cantidad de compuestos químicos que dependen de las reacciones que se llevan a cabo en esta etapa del proceso como lo son las reacciones de Maillard; degradación de Strecker; degradación de trigonelina, ácido quínico, pigmentos, lípidos e interacción de productos intermediarios. El grado de tostado repercute directamente en la fracción volátil del grano de café, ya que se tiene evidencia que en los tostados oscuros se presenta atributos característicos como: tostado, quemado/acre, cenizas/hollín, ácido y picante; mientras, que en el tostado medio se presentan los atributos aromáticos: cacao, nuez y dulce (Bhumiratana *et al.*, 2011).

2.6.4. Molido

La molienda libera el sabor del café, por lo que después de ésta se puede apreciar un aumento en la intensidad del aroma. Esto facilita la extracción de los aromas en la preparación de la bebida; teniendo un importante efecto el tamaño de partícula y grado de molido, ya que un molido muy fino podría repercutir en obtener una bebida demasiado fuerte y amarga; mientras que un molido muy grueso puede generar una bebida insípida, debido a una extracción insuficiente. Se ha registrado

que en café tostado molido los atributos aromáticos: tostado, cacao y dulces disminuyen de acuerdo al grado de tostado. Por otro lado, los atributos aromáticos: tostado, quemado/acre, cenizas/holliniento, agrio y acre incrementaron su intensidad de acuerdo al grado de tostado (Bhumiratana *et al.*, 2011).

2.6.5. Bebida de café a base de distintos tipos de granos

En la evaluación sensorial de una bebida de café elaborada en cafetera con diferentes grados de café tostado; los atributos aromáticos: tostado, quemado/acre y cenizas/holliniento incrementaron en la bebida preparada a base de tostados oscuros; por el contrario, en la bebida preparada con granos en un grado de tostado claro aumentaron los atributos aromáticos dulces; mientras que en bebidas preparadas con granos con un grado de tostado medio, el atributo aromático nuez fue más intenso. La variedad también muestra un impacto en los atributos aromáticos detectados en la bebida, ya que en la bebida preparada con granos de café Bourbon se detectaron con mayor intensidad los aromas: cacao, dulce y agrio; en bebidas preparadas con granos de café etíope se percibieron los aromas: agridulce, ligeramente a cacao y grano; las bebidas a partir de Hawái presentaron los aromas: verde, moho, terrosa (Bhumiratana *et al.*, 2011).

2.6.6. Preparación de la bebida

La preparación de la bebida de café es de vital importancia en la transición de sabores y aromas del grano molido al café en taza. Los diferentes métodos de extracción se pueden resumir en: 1) métodos de decocción (hervido, turko, percoladora, cafés al vacío), los cuales están basados en el contacto directo de agua caliente con café molido y tienen como resultado cierta pérdida del sabor del grano de café; 2) los de infusión (filtro, napoletana), que se realizan sumergiendo o remojando café molido en agua fría o caliente, obteniendo un café suave y 3) los métodos de presión (émbolo, moka y espresso) que se basan en la percolación de un fluido a través de un medio poroso (filtro) y la aplicación de alta presión y calor brindando bebidas con mayor cuerpo (Bhumiratana *et al.*, 2011).

2.6.7. Composición del grano de café

Se ha caracterizado la equivalencia entre la presencia de ciertos componentes químicos y los aromas que presentan los granos de café, clasificándolos en dos grandes grupos: 1) compuestos no volátiles, donde se encuentran los alcaloides (cafeína y trigonelina), que presentan sabor amargo; los ácidos clorogénicos, son característicos por brindar el sabor astringente y amargo; la acidez es ocasionada por compuestos como el ácido cítrico, málico, clorogénico y quínico; el sabor dulce es provisto por los polisacáridos en forma de arabinogalactanos, mananos y celulosa; la fracción lipídica (triacilglicéridos, alcoholes de diterpenos libres y esterificados, esteroides libres y esterificados, tocoferoles), proporcionan el atributo cuerpo y transportan los compuestos volátiles aromáticos y vitaminas liposolubles; las proteínas y aminoácidos son la base de las reacciones de Maillard, por lo que en base a estas se generan diversos compuestos importantes en el sabor del café y la formación de melanoidinas que otorgan un color pardo a la bebida y por último la presencia de minerales que sirven como catalizadores de algunas reacciones bioquímicas y 2) los compuestos volátiles, donde se tiene la presencia de furanos que exhiben aromas dulce y amaltados; compuestos azufrados provén de aromas a tostado y sabores asados y carnosos; las pirazinas otorgan aromas a nuez verde, terroso y tostado; las furanonas responsables del aroma dulce caramelo y compuestos fenólicos que son característicos por su aroma a picante y vainilla (Sunarharum *et al.*, 2014).

2.6.7.1. Contenido de Lípidos en el grano de café

Los lípidos forman parte de los compuestos no volátiles de la bebida de café, los cuales son extraídos en la elaboración de la bebida y a estos se les atribuye el atributo “cuerpo” que es la textura percibida en la boca al momento de degustar una taza de café. Este atributo es de suma importancia, puesto que contiene compuestos volátiles (VOC’s) y vitaminas liposolubles (Sunarharum *et al.*, 2014). Los VOC’s que se han encontrado en la fracción lípidica del grano de café según Hurtado-Benavides, *et al.*, (2016) son los pertenecientes a la familia de los furanos (21.74–29.63%), pirazinas (12.5–22.86%), cetonas (5.00–17.14%), fenoles (6.45–17.07%), pirroles (7.69- 12.50%), piridinas (2.17–3.23%), lactonas (2.17–3.70%), tiofenos (2.38–3.23%), tiazoles (2.17–2.50%) y ácidos carboxílicos (2.55–7.69%) (porcentaje de área relativa). Dentro de los cuales, las pirazinas, furanos y cetonas han mostrado tener un alto impacto en el aroma del café (González y Gonzalez, 2011). Por otro lado, se tiene que en *Coffea arabica* L., los furanos, pirazinas, piridinas y pirroles son los principales compuestos encontrados en el grano de café verde (González-Ríos *et al.*, 2007). En general se puede decir que el contenido de lípidos que sea aportado por el grano de café a la bebida ejerce un efecto positivo a la calidad de la taza de café, ya que se ha encontrado que el contenido de lípidos (20%) de una variedad híbrido de Timor mejoró la calidad sensorial en la taza de café en específico en el atributo cuerpo y calidad aromática con respecto a una variedad Typica (17%) (Ramírez-Hernández, 2017).

2.7. Fracción lipídica del grano de café

La mayor parte de los lípidos del grano de café, se encuentran en el endospermo en cantidades de aceite que varían de acuerdo a la especie (arabica o robusta), teniendo aproximadamente un 15% (p/p) en granos arábicos, mientras que en granos robustas un 10% (p/p). La fracción lipídica del grano de café está compuesta principalmente por triacilglicéridos, diterpenos y esteroides. En donde, los diterpenos ocupan aproximadamente el 20% del total de lípidos (TABLA 2.2). También se ha reportado en la fracción lipídica del café en forma libre ácidos grasos y diterpenos, los cuales representan de acuerdo a la variedad aproximadamente 1 y 7% del total de lípidos, respectivamente (Nikolova-Damyanova *et al.*, 1998 y Speer y Kölling-Speer, 2006).

TABLA 2.2. Composición de lípidos del aceite de café verde

Compuesto	% materia seca
Triacilglicéridos	75.2
Esteres de diterpenos, alcoholes y ácidos grasos	18.5
Alcoholes diterpenos	0.4
Esteres de esteroides y ácidos grasos	3.2
Esteroides	2.2
Tocoferoles	0.04-0.06
Fosfátidos	0.1-0.5

(Speer & Kölling-Speer, 2006).

2.7.1. Ácidos grasos en el grano de café verde y tostado

Los ácidos grasos en el aceite de café se encuentran mayoritariamente en forma esterificada y una menor parte en “forma libre”. En la forma esterificada los ácidos grasos se encuentran como triacilglicéridos (TABLA 2.3), esteres de diterpenos y un pequeño porcentaje como esteres de esteroides; por otro lado, en la forma libre se han localizado 9 ácidos grasos en granos de café arábica y robusta (ácido mirístico (C14:0), palmítico (C16:0), esteárico (C18:0), oleico (C18:1), linoleico (C18:2), linolénico (C18:3), araquidónico (C20:0), behénico (C22:0) y ácido tetracosanoico (C24:0)) (Speer y Kölling-Speer, 2006).

TABLA 2.3. Ácidos grasos en triacilglicéridos de grano de café verde (%)

Ácido graso	Robusta (n=9; min-max)	Arabica (n=4; min-max)
C16:0	27.2-32.1	26.6-27.8
C18:0	5.8-7.2	5.6-6.3
C18:1	9.7-14.2	6.7-8.2
C18:2	43.9-49.3	52.2-54.3
C18:3	0.9-1.4	2.2-2.6
C20:0	2.7-4.3	2.6-2.8
C22:0	0.3-0.8	0.5-0.6
C24:0	0.3-0.4	0.2-0.4

(Speer & Kölling-Speer, 2006).

En el tostado se ha observado un deterioro del aceite del grano de café, debido a cambios químicos originados por las reacciones de Maillard, degradación de Strecker, degradación lípidos entre otros. Entre estas reacciones, los cambios oxidativos de la fracción lipídica están dados por el aumento o producción de peróxidos, dienos conjugados, trienos conjugados y formación de ácidos grasos trans, los cuales son indicadores de la degradación de los ácidos grasos (Budryn *et al.*, 2012).

En cuanto a la fracción de ácidos grasos del grano de café tostado, esta puede variar ya sea por tratarse de granos de procedencia y especie diferente o por las condiciones en las que se lleve a cabo el tostado (TABLA 2.4). Esta variación se puede dar ya sea por la oxidación de lípidos o por la formación de “ácidos grasos

ANTECEDENTES

trans". Se ha determinado que al emplear temperaturas bajas y aire seco en el tostado, no hay formación de ácidos grasos trans, pero el grano de café no se tuesta completamente; mientras que al utilizar temperaturas moderadas y aire húmedo hay evidencia de cambios oxidativos (formación de peróxidos) y formación de ácidos grasos trans, especialmente de ácido trans-linoleico y ácido trans-hexadecenoico, aunque el aroma de este café obtiene una alta calificación sensorial; del mismo modo, se ha determinado que las condiciones de tostado de 210 °C, 1% de humedad relativa de aire de secado a una velocidad de 1 m/s, durante 15 y 25 min, no promueven la formación de ácidos grasos trans, reducen los niveles de peróxidos y se obtuvo una alta calidad aromática en la evaluación sensorial de la taza de café respecto al aroma (Budryn *et al.*, 2012).

TABLA 2.4. Ácidos grasos en triacilglicéridos de grano de café arabica tostado (%)

Ácido graso	Café verde	190 °C 0.5m.s ⁻¹ Seco por 18 min	203 °C 1 m.s ⁻¹ 1%H por 30 min	210 °C 1 m.s ⁻¹ 1%H por 25 min
C14:0	nd	nd	nd	nd
C15:0	nd	nd	0.02 ^a	nd
C16:0	34.72 ^c	34.74 ^c	34.35 ^{b,c}	33.50 ^{b,c}
C16:1c	nd	nd	0.02 ^a	nd
C16:1t	nd	nd	0.02	nd
C17:0	0.12 ^b	0.12 ^b	0.10 ^{a,b}	0.11 ^b
C18:0	7.36 ^a	7.58 ^b	7.55 ^b	7.66 ^c
C18:1c	8.82	8.89	9.21	8.92
C18:1n7	0.27 ^a	0.31 ^{a,b}	nd	0.36 ^{b,c}
C18:2 cc	43.73 ^{b,c}	42.88 ^{a,b}	43.67 ^b	44.13 ^{c,d}
C18:2 ct	nd	nd	0.07	nd
C18:3	1.25 ^a	1.24 ^a	1.40 ^c	1.32 ^b
C20:0	2.65 ^a	2.78 ^{b,c}	2.66 ^a	2.84 ^c
C20:1	0.32 ^b	0.30 ^{a,b}	0.34 ^c	0.30 ^{a,b}
C22:0	0.57 ^a	0.89	0.49	0.67 ^b
C24:0	0.19 ^{a,b}	0.27 ^c	0.01	0.19 ^{a,b}

(Budryn *et al.*, 2012).

^a diferentes en la misma fila indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

2.7.2. Diterpenos en el grano de café verde y tostado

Los diterpenos cafestol ($C_{20}H_{28}O_3$) y kahweol ($C_{20}H_{26}O_3$) son alcoholes pentacíclicos, formados por una cadena carbonada de 4 isoprenos, esta estructura puede ser lineal o cíclica, la cual recibe el nombre de kaureno. La estructura de estos dos diterpenos, solo se diferencia por la existencia de un doble enlace entre el carbono 1 y 2 para kahweol y cafestol respectivamente (FIGURA 2.5) (Good *et al.*, 2013). Cafesto y kahweol, solo son producidos en plantas del género *Coffea* y en cantidades dependientes de la especie, lo que les da singularidad (De Oliveira *et al.*, 2014).

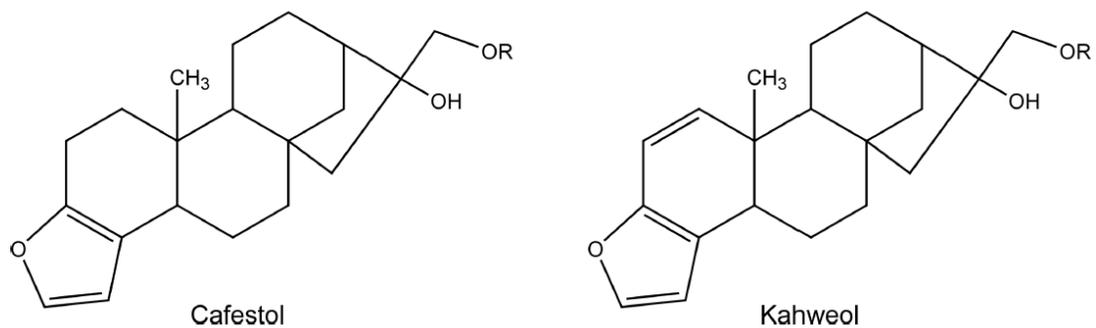


FIGURA 2.5. Estructura molecular de los diterpenos cafestol y kahweol. (Good *et al.*, 2013).

Entre los factores que afectan la composición del grano de café, la variabilidad genética es fuertemente relevante. Además, el procesamiento post-cosecha al que es sometido el café cereza, especialmente el tostado es de vital importancia en el contenido de diterpenos en el grano de café (Good *et al.*, 2013).

La concentración de diterpenos cafestol y kahweol en el café verde de diferentes cultivos de café ha mostrado diferencia significativa, ya que se tiene evidencia que los cultivos IPR y Catuai en dos cosechas realizadas en las mismas condiciones edafoclimáticas mostraron un rango de concentración de cafestol de

ANTECEDENTES

221-604 mg/100 g de café verde y de kahweol de 371-986 mg/100 g de café verde (TABLA 2.5); por su parte, granos de café arabicos han mostrado contenidos de 270-800 mg de cafestol/100g de café verde y 110-600 mg de kahweol/100 g de café verde; en cuanto a cultivos Icatu se obtuvieron contenidos de 501 mg de cafestol/100 g de café verde y 433 mg de kahweol/100 g de café verde, mientras que del mismo cultivo se obtuvo de café tostado 683 mg de cafestol/100 g y 635 mg de kahweol/100 g; por otro lado, en grano de café tostado de los cultivos mostrados en la TABLA 2.6, se observan contenidos de 246-668 mg de cafestol/100 g de café y 439-1096 mg de kahweol/100 g de café dependiendo del cultivo y año en el que se llevó la cosecha (Good *et al.*, 2013).

TABLA 2.5. Contenido de cafestol y kahweol (mg/100 g de café verde) de diferentes cultivos en la cosecha 2009 y 2010

Diterpeno	Cosecha	Cultivo			
		Catuaí	IPR 100	IPR 102	IPR 106
Cafestol	2009	608+8 ^{aa}	328+32 ^{ba}	356+34 ^{bb}	325+14 ^{ba}
	2010	422+13 ^{bb}	221+16 ^{cb}	480+2 ^{aa}	259+6 ^{cb}
Kahweol	2009	371+6 ^{ca}	892+59 ^{aa}	605+52 ^{ba}	986+46 ^{aa}
	2010	451+6 ^{ca}	673+43 ^{bb}	539+2 ^{ca}	847+34 ^{aa}
Suma	2009	975+13 ^{ba}	1221+91 ^{abA}	960+86 ^{ba}	1312+60 ^{aa}
	2010	873+19 ^{bb}	894+59 ^{bb}	1020+0 ^{abB}	1106+40 ^{ab}

Letras minúsculas diferentes en el mismo renglón indican diferencia significativa entre cultivos ($p \leq 0.05$)

Letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencia significativa entre cosechas para el mismo componente ($p > 0.05$)

(media + desviación estándar)

(Good *et al.*, 2013).

De acuerdo a la TABLA 2.5 la similitud genética es determinante también en el contenido y tipo de diterpenos, puesto que los cultivos IPR mostraron una relación de diterpenos de kahweol/cafestol de 1.1-3.5 y los cultivos Catuaí una relación de kahweol/cafestol de 0.6-1.1, lo que quiere decir que en los cultivos IPR hay mayor contenido de kahweol, mientras que en los cultivos Catuaí el contenido de cafestol es mayor (Good *et al.*, 2013).

TABLA 2.6. Contenido de cafestol y kahweol (mg/100 g de café tostado) de diferentes cultivos en la cosecha 2009 y 2010

Diterpeno	Cosecha	Cultivo			
		Catuaí	IPR 100	IPR 102	IPR 106
Cafestol	2009	668+52 ^{aA}	339+17 ^{bA}	394+7 ^{bB}	357+5 ^{bA}
	2010	541+ ^{aB}	270+1 ^{cB}	427+1 ^{bA}	246+9 ^{dB}
Kahweol	2009	439+43 ^{cA}	939+25 ^{aA}	691+4 ^{bA}	1096+83 ^{aA}
	2010	556+9 ^{bA}	812+20 ^{aB}	548+20 ^{bB}	851+41 ^{aB}
Suma	2009	1107+96 ^{bA}	1278+42 ^{abA}	1086+3 ^{bA}	1453+88 ^{aA}
	2010	1097+12 ^{aA}	1082+21 ^{abB}	975+21 ^{bB}	1097+51 ^{aB}

Letras minúsculas diferentes en la mismo renglón indican diferencia significativa entre cultivos ($p \leq 0.05$)

Letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencia significativa entre cosechas para el mismo componente ($p > 0.05$)

(media seguida de desviación estándar)

(Good *et al.*, 2013).

Por último, la TABLA 2.6 indica cierta estabilidad de los diterpenos en el proceso de tostado empleado por Good *et al.*, (2013). Lo que podría deberse al grado de tostado y condiciones empleadas en este proceso, puesto que en este estudio el proceso de tostado se llevó a cabo a una temperatura de entre 200-210 °C por un tiempo de entre 8-10 min, resultando en un tostado medio. Por otro lado, Eloy-dias *et al.*, (2014), estudiaron un proceso de tostado a 230 °C, en el cual obtuvieron una disminución de un 60 a 75% de cafestol y kahweol. Además determinaron que a partir del minuto 8 en el tostado hubo formación de las formas deshidratadas de diterpenos (dehidrokahweol y dehidrocafestol) y el grado de tostado obtenido fue un tostado oscuro.

3. JUSTIFICACIÓN

La demanda actual de café exige al productor mexicano tener cultivos que brinden altos rendimientos de producción, sean resistentes a enfermedades, produzcan a edad temprana y además sean seguros para la salud humana, por lo que se han generado nuevas variedades de café, como son los híbridos cultivados en el municipio de Huatusco, Veracruz, México “Mundo Maya” y “Mundo Mex” los cuales han exhibido en campo capacidades de tolerancia a hongos, nemátodos, resistencia a la roya, además de tener producción precoz.

Sin embargo, hasta el momento no hay información del perfil lipídico del aceite de éstos y el efecto del perfil de temperatura en el tostado en tambor rotatorio.

4. HIPOTESIS

Los tratamientos térmicos empleados en el tostado por tambor rotatorio no afectan el contenido de ácidos grasos principales (esteárico, palmítico, oleico, linoleico, y linolénico) y cafestol del grano de café.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Evaluar el efecto de los tratamientos térmicos en un tostador de tambor rotatorio sobre la fracción lipídica del grano de café cultivado en la región de Huatusco.

5.2. Específicos

Caracterizar el contenido de grasa total, ácidos grasos mayoritarios y cafestol de 2 nuevas variedades de *Coffea arabica* L., Mundo Mex (H15) y Mundo Maya (H16), cultivadas en Huatusco, Veracruz.

Evaluar el impacto del proceso de tostado en tambor rotatorio, empleando 9 tratamientos térmicos sobre el contenido de grasa total y ácidos grasos de las variedades de café H15 y H16.

Estudiar el efecto del tratamiento térmico del tostado en tambor rotatorio sobre el contenido de cafestol en los híbridos de café en estudio.

6. METODOLOGÍA

El desarrollo de la presente investigación se llevó a cabo mediante la metodología general mostrada en la FIGURA 6.1. Se basó en el beneficiado de café, determinación del perfil de ácidos grasos y cafestol de granos de café verde, el impacto del perfil de temperatura sobre la fracción de lípidos del café tostado y la evaluación del efecto de diferentes perfiles de temperatura en el tostado sobre los ácidos grasos mayoritarios y cafestol en el grano de café.

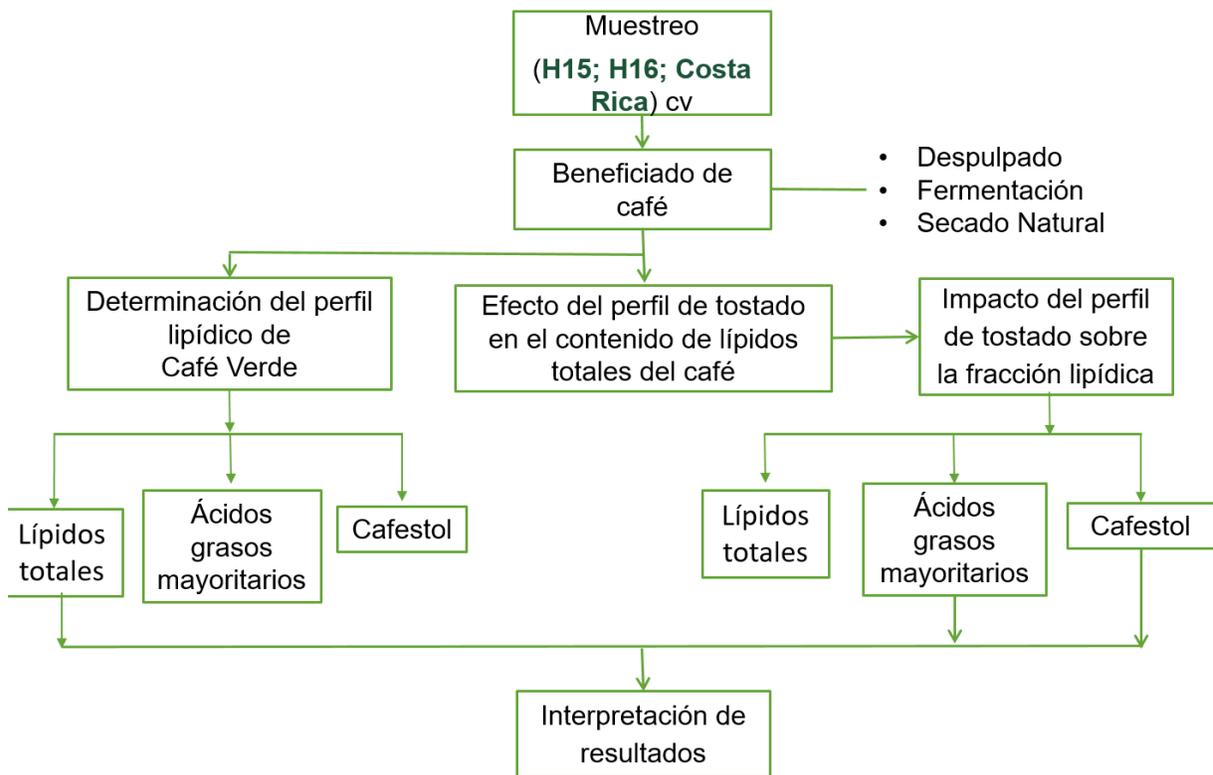


FIGURA 6.1. Diagrama de flujo general

6.1. Material biológico

La matriz analítica a estudiar fue el grano de café verde de la especie *Coffea arabica* de las variedades Costa Rica, Mundo Maya (H16) y Mundo Mex (H15) (TABLA 6.1.), cultivado en las fincas “Los Tecolotes” localizada en el municipio de Huatusco (19°10’23.8’’ N; -96°97’08.7’’ W y 1,300 msnm) y “Doña Felisa” (19°13’45.5’’ N; -96°58’29.4’’ W y 1500 msnm), ubicado en la zona central del estado de Veracruz. Donde en el periodo 2017-2018, se tuvo la primera cosecha de estos híbridos. Se tomó una muestra de 300 kg por variedad, sumando 900 kg de café cereza.

TABLA 6.1. Variedades de estudio.

Característica	Costa Rica Híbrido de Timor 832/1 x Caturra	Mundo Mex (H 15) Descripción genética TimorxET26	Mundo Maya (H 16) Descripción genética: Sarchimor T5296 x ET01
Calidad en tasa	Baja	Muy buena	Muy buena
Porte	Bajo/compacto	Enano	Enano
Rendimientos	Altos	Altos	Altos
Altitud óptima (msnm)	1000-1600	1200	800-1500
Resistente a roya	No	No	Si
Tolerante a nematodos	No	No	Si
Tolerante a antracnosis de la cereza	No	Si	Si
Primer cosecha	Año 3	Precoz	Precoz
Requerimientos nutricionales	Altos	Altos	Altos
Tamaño del fruto	Promedio	Grandes	Grandes
Color del brote de las hojas	Bronce	Verde	Bronce

(WCR, 2016).

6.2. Beneficiado vía húmeda de café

6.2.1. Beneficio húmedo

El beneficiado húmedo se realizó en la finca “Los Tecolotes” de acuerdo a Ramírez-Hernández (2017). En donde, se tuvo una recepción de café cereza para ser procesado por la vía húmeda o beneficiado húmedo de café, que consistió en un lavado-despulpado, fermentación, flotación-lavado y secado.

6.2.1.1. Recepción

El café cereza fue recibido (FIGURA 6.2) y se generaron lotes de 150 kg de café cereza de un total de 1000 kg que ingresaban diariamente al beneficio. Los lotes fueron recibidos de la siguiente manera: el día 1, un lote de la variedad H15; el 2, un lote de la variedad Costa Rica; el día 3, se recibió un lote de la variedad H16. El resultando fue la adquisición de 3 lotes de 150 kg de café cereza en la primera semana, mientras que en la segunda se realizó una réplica.



FIGURA 6.2. Recepción de café cereza.

6.2.1.2. Lavado y Despulpado

Una vez recibido el café cereza, este fue despedrado, deshojado y despulpado, mediante un módulo integrado con despedrador, criba y un mecanismo de despulpe por medio de discos (FIGURA 6.3.). Dicho sistema emplea agua y tornillos helicoidales para el transporte de la cereza y grano de café o pulpa.



FIGURA 6.3. Despulpado de la cereza de café.

6.2.1.3. Fermentación

De los seis lotes de café ya despulpado, se realizó una fermentación sumergida por duplicado a cada lote (FIGURA 6.4.). La fermentación se llevó a cabo a temperatura ambiente en 6 cubas de fermentación de plástico. Se registró la temperatura y acidez con un potenciómetro HANNA HI 2210 durante 32h.



FIGURA 6.4. Fermentación del grano de café mucilago.

6.2.1.4. Flotación y lavado

Al término de la fermentación, se desechó el agua de fermentación y se agregó agua potable en exceso para separar los granos vanos, mediante una malla y posteriormente se realizaron 3 o 4 lavados (FIGURA 6.5.) hasta que del grano ya no emerjan granos vanos, solidos provenientes de la fermentación o cerezas no despulpadas.



FIGURA. 6.5. Lavado del grano fermentación del grano de café.

6.2.1.5. Secado

El secado del grano de café, se realizó en zarandas a condiciones ambientales (FIGURA 6.6.), hasta que el café pergamino alcanzó un contenido de humedad del 12%. El grano de café fue removido en las zarandas cada 4 horas los primeros días, mientras que el último se removió cada 3 horas con el fin de alcanzar mejor homogeneidad en el contenido de humedad del grano. Las condiciones ambientales fueron monitoreadas con un higrómetro HOB0® temp/RH logger.



FIGURA 6.6. Secado al sol del grano de café pergamino.

6.2.2. Beneficiado seco de café

El café pergamino seco con un contenido de humedad del 12% fue levantado y empacado en bolsas de polipropileno y agrupado en cajas de plástico sanitizadas para su transporte a la UNIDA, donde se sometió a un cuarteo para tomar muestras representativas de cada lote y así originar muestras a las cuales se les trillo y clasifíco en base a tamaño de grano. De acuerdo a esto se eligió como muestra el grano de café de un tamaño de malla de 18/64 y 17/64 a los cuales se les realizo un análisis físico, se determinó el contenido de humedad y grasa. El análisis de defectos se realizó en base a la NMX-F-158-SCFI-2008 y la NMX-F-162-SCFI-2008; el contenido de humedad se determinó en base a la NF ISO 11294 1994 y el contenido de grasa en base a la NMX-F-013-SCFI-2000 y NMX-089-S-1978.

El almacenamiento del café restante se llevó a cabo en un cuarto acondicionado a 18 °C, donde fueron almacenados los granos de café pergamino en bolsas al vacío contenidas en cajas oscuras y selladas herméticamente para disminuir el cambio de su composición en un periodo no mayor a 3 meses. Durante el siguiente mes, se sometió al beneficio seco al resto del café, siendo almacenado el café verde en bolsas al vacío dentro de cajas herméticas en el transcurso que se llevó a cabo el procesamiento del total del café para ser tostado. Posteriormente, al ser tostado el café se tomó una muestra de cada tratamiento térmico para realizar el almacenamiento a las mismas condiciones que el café pergamino y verde, en un periodo no mayor a un mes.

6.3. Tostado del grano de café

Una muestra de café verde de 1 kg de cada variedad (variedad híbrida H15, H16 y var. Costa Rica), se sometió a un proceso de tostado en un tostador de tambor rotatorio automático modelo T3KA con capacidad máxima de 5 kg. Se emplearon 9 tratamientos térmicos diferentes, donde se varió la temperatura de precalentamiento (Tp), cambio de flama (Tc) y final (Tf) de acuerdo al criterio de temperatura alta (230 °C), media (220 °C) y baja (180 °C) estandarizado con base a Hernández (2015) (TABLA 6.2.) y mediante pruebas experimentales para la determinación de las temperaturas “Alta, Media y Baja” en cada etapa del proceso de tostado para el grano en cuestión, debido a que las propiedades físicas y químicas del mismo impacta directamente sobre las condiciones de tostado que se deban aplicar a este para que se lleve a cabo el proceso de tostado. De acuerdo a lo anterior, se fijaron temperaturas “Altas, Medias y Bajas” para cada etapa del proceso de tostado.

TABLA 6.2. Temperaturas empleadas en el proceso de tostado

Condición	Tp (°C)	Tc (°C)	Tf (°C)
Alta	240	200	215
Media	230	190	207
Baja	220	180	200

Teniendo en cuenta esto, se originaron nueve tratamientos térmicos, donde se cambió la Temperatura Alta, Media y Baja en las etapas de precalentamiento, cambio de flama y final, variando también la intensidad de flama a Alta, Media y baja en cada etapa del proceso de tostado (TABLA 6.3.).

TABLA 6.3. Tratamientos térmicos empleados en el tostado

Temperatura	1 (°C)		2 (°C)		3 (°C)	
Precalentamiento (Tp)	240		230		220	
Cambio de flama (Tc)	190	M	180	M	200	M
Final (Tf)	200	B	215	B	207	B
Temperatura	4 (°C)		5 (°C)		6 (°C)	
Precalentamiento (Tp)	240		230		220	
Cambio de flama (Tc)	190	B	180	B	200	B
Final (Tf)	200	A	215	A	207	A
Temperatura	7 (°C)		8 (°C)		9 (°C)	
Precalentamiento (Tp)	240		230		220	
Cambio de flama (Tc)	190	A	180	A	200	A
Final (Tf)	200	M	215	M	207	M

Donde se tiene intensidad de flama A= Alta; M= Media y B= Baja.

Cada variedad de café fue sometida a los 9 tratamientos de temperatura en el proceso de tostado de una manera aleatoria, generando un programa de tostado para cada día de tostado (TABLA 6.4.).

TABLA 6.4. Orden de tostado por variedad.

Día	Tratamiento	Variedad	Día	Variedad	Día	Variedad
1	1	H15	2	H16	3	Costa rica
	2	Costa rica		H15		H16
	3	H16		Costa rica		H15
	4	H15		H16		Costa rica
	5	Costa rica		H15		H16
	6	H16		Costa rica		H15
	7	H15		H16		Costa rica
	8	Costa rica		H15		H16
	9	H16		Costa rica		H15

Finalmente, se realizó una réplica del tostado generando lotes correspondientes a los días 4, 5 y 6 de tostado.

6.4. Molienda del café verde y tostado

El grano de café verde y tostado fue molido y tamizado por separado a un tamaño de partícula de 0.380 mm (malla 40: fino) de acuerdo a la NMX-F-013-SCFI-2000.

6.5. Obtención de extracto etéreo

El café molido (5g), se sometió a una extracción por el método de determinación de extracto etéreo, según la metodología descrita en la norma NMX-F-089-S-1978 y NMX-F-013-SCFI-2000 de café verde y tostado del híbrido Mundo Maya, Mundo Mex y de la variedad Typica, usando como solvente éter de petróleo (Sigma-Aldrich), durante un periodo de 4 horas a 55-75 °C y velocidad de condensación de 2 gotas/s. Se utilizó un equipo Soxhtec System HT 1043 (FIGURA 6.7.), el que contaba con 5 extractores individuales.



FIGURA 6.7. Soxhtec System HT 1043.

6.6. Determinación del perfil de ácidos grasos en café verde y tostado

Para la determinación del perfil de ácidos grasos mayoritarios, se realizó una transesterificación alcalina al extracto etéreo de café verde o tostado con modificaciones realizadas por el Lab. de manejo Postcosecha (FIGURA 6.8.), donde se llevó a cabo una metilación a una muestra de 20 mg de aceite (extracto etéreo) con la adición de 100 μ L de estándar interno de ácido tridecanoico con una pureza

de 98% (Sigma-Aldrich) en hexano (1.28 mg/mL). Posteriormente, se añadieron 1.25 mL de una solución 0.5 M de metóxido de sodio en metanol, se calentó a 80 °C por 10 min y se enfrió en baño de hielo. Después se adicionaron 1.83 mL de N,N-Dimetilformamida y 2 mL de hexano, se homogenizo en vortex y se adicionaron 2.5 mL de una solución de carbonato de calcio (90 g/L). Por último se centrifugo a 3500 rpm por 15 min para transferir el hexano en viales e inyectar 1 µL al CG-FID (Castro-Gómez *et al.*, 2014).

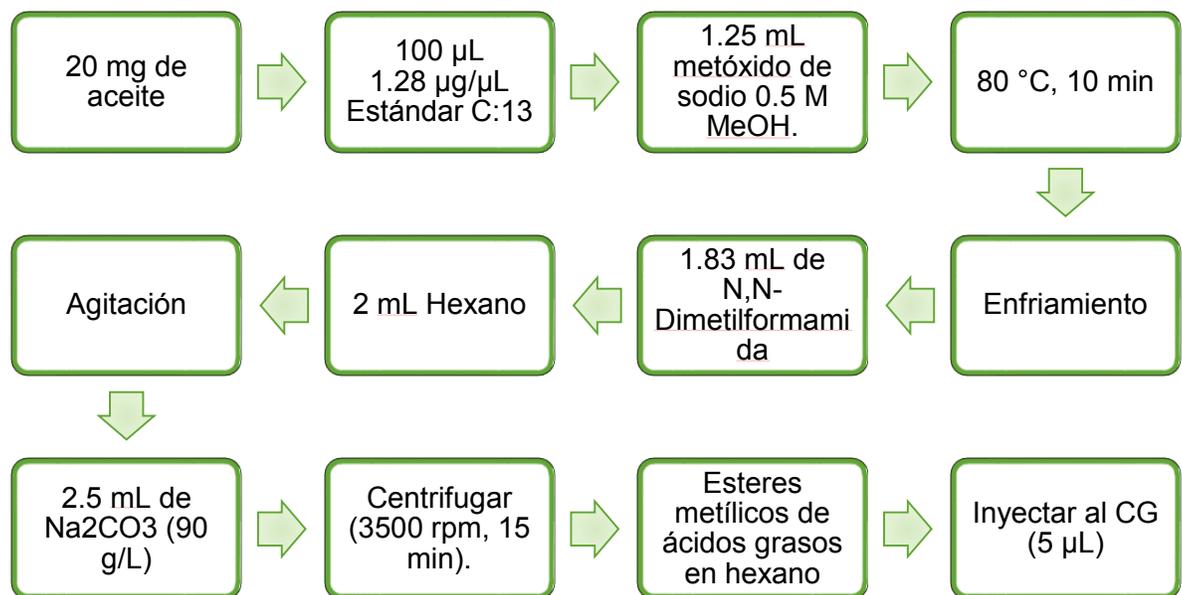


FIGURA 6.8. Diagrama de transesterificación alcalina de ácidos grasos

(Castro-Gómez *et al.*, (2014) con modificaciones realizadas por el Lab. de manejo Postcosecha).

La fracción de ácidos grasos mayoritarios se identificó y cuantificó usando un cromatógrafo de gases-FID (FIGURA 6.9.), equipado con una columna SPTM - 2560 Poli (biscianopropil siloxano) 70 m x 0.18 mm x 0.14 µm y se usó N₂ como gas acarreador (1.5 mL/min). Para la identificación de ácidos grasos se empleó un estándar interno de ácido tridecanoico, mientras que para la cuantificación de ácidos grasos se utilizó un estándar externo F.A.M.E. Mix (C8-C24, Sigma-Aldrich). La separación de ácidos grasos se realizó a partir de una temperatura inicial de 150 °C, seguida de una rampa de 15°C/min hasta llegar a 210 °C, sosteniéndose por 6

min para aumentar nuevamente a una razón de 2 °C/min hasta 230 °C manteniéndose a esa temperatura durante 5 min. El puerto de inyección y detector se operaron a una temperatura de 230 y 240 °C, respectivamente. El modo de inyección fue Split 1:20 a 50 mL/min y el tiempo de corrida total fue de 25 min.



FIGURA 6.9. Cromatógrafo de gases

6.7. Determinación de cafestol en el café verde y tostado

El contenido de cafestol en el café verde o tostado fue determinado de acuerdo a la metodología provista por Good *et al.* 2013 (FIGURA 6.10.). Donde una muestra de aceite de ± 200 mg fue saponificada a 80 °C por la adición de 2 mL de una solución 2.5 M de KOH en etanol con 96% de pureza (v/v) (Sigma-Aldrich). Después se agregaron 2 mL de agua destilada (Sigma-Aldrich), para ser separada la fracción insaponificable, mediante una extracción con 2 mL de tert-butil metil éter (grado reactivo, Sigma-Aldrich), se agita y centrifuga a 3000 rpm durante 3 min repetidamente hasta recuperar la fase orgánica. Posteriormente se añadieron 2 mL agua destilada y se “evaporó a sequedad” en termoblock a 70 °C por 15 min, se suspendió el extracto en 4 mL de fase móvil (acetonitrilo/agua 55:45 v/v) y se filtró a través de una membrana de nylon de 0.45 μ m (Sigma-Aldrich).

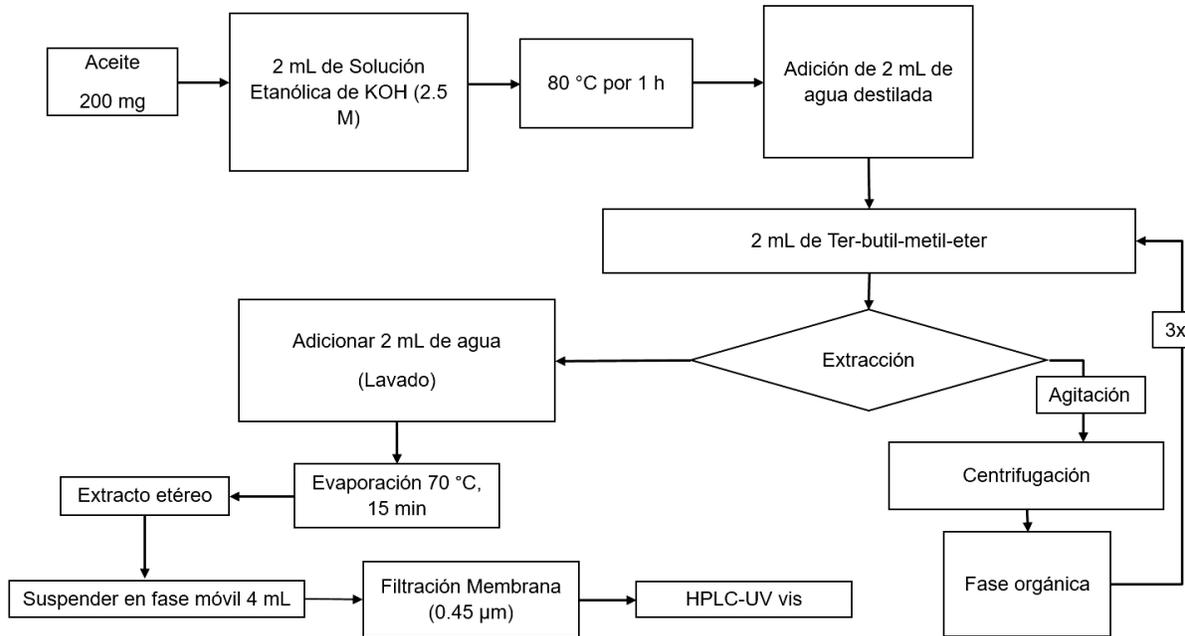


FIGURA 6.10. Diagrama de flujo de la saponificación del extracto etéreo de café verde o tostado.

(Good *et al.*, 2013).

El análisis se llevó a cabo en un HPLC-UV vis SHIMADZU (FIGURA 6.11.) equipado con una columna Spherisorb® ODS 1, de 5 µm de tamaño de partícula, 25 cm de longitud y 3.2 mm de diámetro interno, empleando una elución isocrática a una tasa de flujo de 0.9 mL/min. La detección fue a 230 nm, manteniendo la temperatura a 30 °C durante 17 min de separación. Se identificó mediante coelución de un estándar interno de cafestol (98% de pureza, Sigma-Aldrich). La cuantificación se realizó mediante la generación de una curva de calibración con un estándar externo de cafestol a 6 diferentes concentraciones (50-1000 ppm). Las muestras fueron diluidas 0.01 µL muestra/µL fase móvil. Se inyectó con el uso de un loop de 20 µL.



FIGURA 6.11. Cromatógrafo de líquidos de alta eficacia.

6.8. Análisis estadístico de la fracción lipídica del grano de café.

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente con el software NCSS11 por ANOVA (Tukey-Kramer) ($p \leq 0.05$) para las muestras de café verde y MANOVA para las muestras de café tostado con el fin de determinar si hubo un efecto en el factor variedad y tratamiento térmico sobre la fracción lipídica del grano de café de las variedades estudiadas en el proceso de tostado.

7. Resultados y discusión

7.1. Beneficio vía húmeda de café

El beneficiado de café se realizó por la vía húmeda como se describe en el punto 6.2., en donde se beneficiaron lotes de aproximadamente 150 kg por duplicado. Cada lote genero 2 sub-lotes, teniendo un rendimiento global promedio de 0.1, 0.106 y 0.089 para la variedad Costa Rica, H15 y H16, respectivamente (TABLA 7.1.).

7.1.1. Beneficio húmedo de café

El beneficio húmedo se realizó en el municipio de Huatusco, siendo recibido a razón de 150 kg para posteriormente ser lavado, despulpado, fermentado-Lavado y secado. Es conocido que la etapa del despulpado es la más importante respecto a pérdida de masa de la cereza de café. Sin embargo, se observan bajos rendimientos de despulpado, atribuidos al tipo y antigüedad de la despulpadora empleada para este proceso. Por consiguiente, se obtuvieron rendimientos bajos debido a la pérdida de masa (TABLA 7.1.) en la Fermentación-Lavado, ya que mediante el lavado se retiró una gran cantidad de cerezas no despulpadas en la etapa anterior.

TABLA 7. Rendimientos de las etapas en el beneficiado.

Variedad	Costa Rica	H15	H16
Etapas de proceso	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Recepción	150	151	150
Despulpado	0.587±0.019	0.621±0.021	0.592±0.008
Fermentación-Lavado	0.690±0.026	0.674±0.009	0.667±0.015
secado	0.496±0.017	0.502±0.002	0.45±30.048
Y global	0.1±0.003	0.106±0	0.089±0.01

Media ± desviación estándar

Resultados y discusión

Por otro lado, es importante mencionar que la realización del beneficio húmedo de manera controlada es de vital importancia, debido a que en éste, se producen precursores de sabor y aroma para la taza de café, pero también es necesario evitar la contaminación por hongos o pérdida de compuestos bioquímicos. Es por esto que el beneficio húmedo se realizó en condiciones ambientales que normalmente se presentan en finca.

La etapa de fermentación del café en mucilago es el punto donde se forman los precursores de aroma y sabor que posteriormente caracterizarán a la taza de café. Por ello, se realizó un seguimiento de la temperatura y pH del café beneficiado, cada 12 horas (TABLA 7.2.).

TABLA 8. Seguimiento de la fermentación.

variedad	t ₀		t (12 h)		t (24 h)		t (32 h)	
	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)
H15	6.95±0.09	15.05	5.24±0.04	19.55	4.85±0.18	22	4.55±0.21	14.65
H16	6.90±0.13	18.9	5.27±0.04	18.3	4.20±0.16	22.8	3.92±0.05	19.45
Costa Rica	7.46±0.80	16.55	5.195±0.06	17.75	4.54±0.56	20.75	4.31±0.41	15.6

Media ± desviación estándar

Se realizó el seguimiento del pH y T durante el proceso de fermentación (FIGURA 7.1.), para garantizar que los tratamientos que se le dieron a las diferentes muestras se estaban realizando de la misma manera.

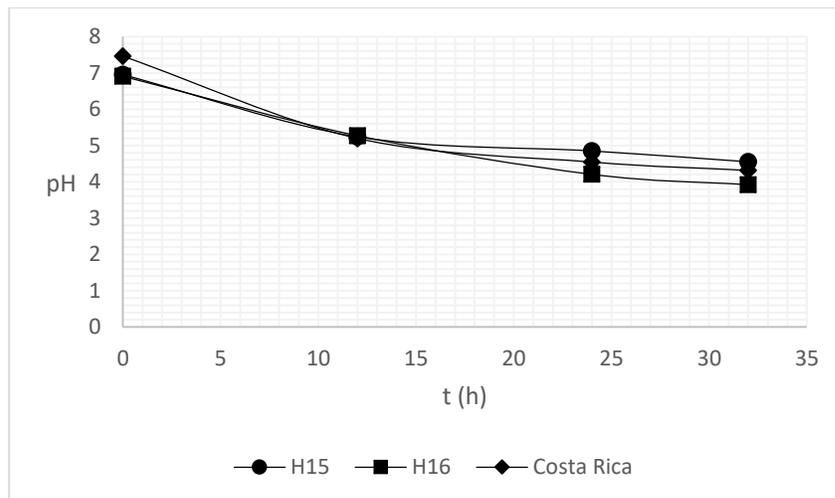


FIGURA 7.1. Evolución del pH en la fermentación.

Resultados y discusión

El secado del café pergamino se realizó de manera intermitente, debido a que se llevó a cabo a temperatura ambiente, por lo que durante el día perdió humedad, mientras que en el transcurso de las noches adsorbió humedad y así sucesivamente, hasta que el grano de café alcanzó un contenido de humedad del 12%. Es importante mencionar que los cambios mayores de temperatura entre el día y la noche, se dieron los tres primeros días de secado (FIGURA 7.2.).

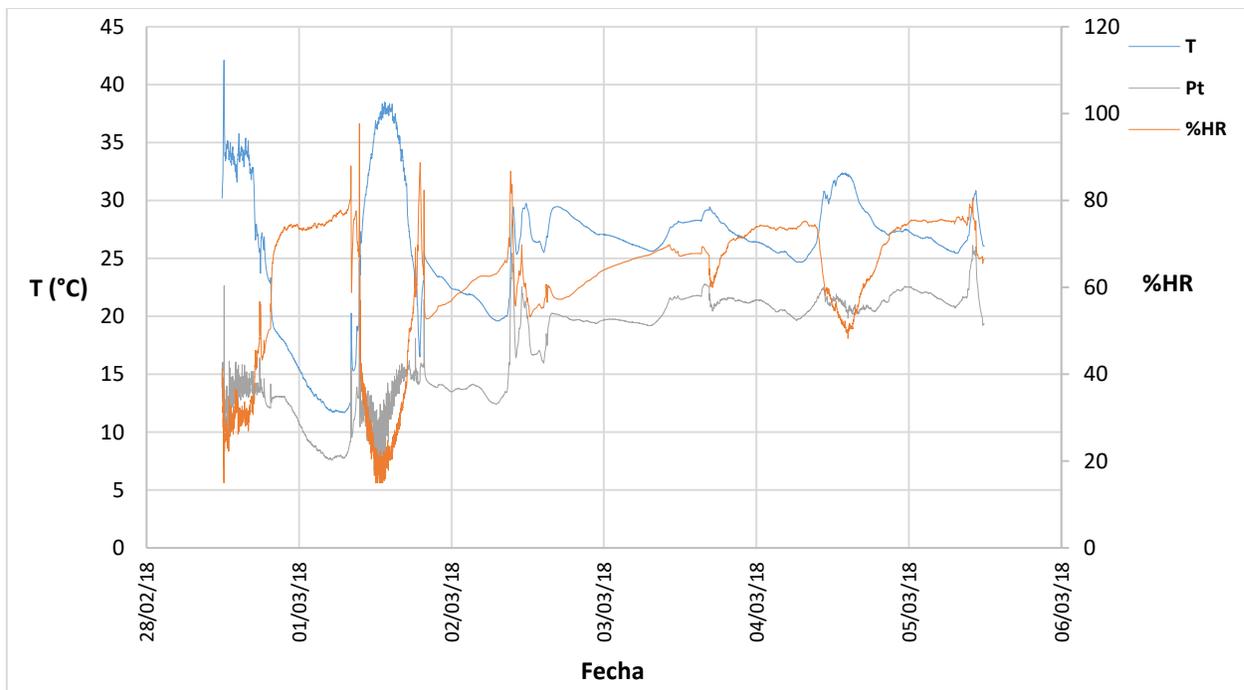


FIGURA 7.2. Seguimiento de la T y %HR del aire ambiente en el secado.

Cabe destacar que la FIGURA 7.2., muestra como el comportamiento de las condiciones ambientales siguió aproximadamente el mismo patrón en las condiciones ambientales, lo que nos indica que el tratamiento que se le dio a las muestras durante el secado no tuvo variaciones importantes.

7.1.2. Beneficio seco de café

El beneficiado seco de café se realizó en la UNIDA. Se tomó una muestra representativa de todos los lotes mediante el método de cuarteo. Posteriormente, se realizó el trillado que consiste en eliminar el pergamino (endospermo) por abración mecánica. Se determinó el rendimiento del trillado. Teniendo un rendimiento promedio de 0.809, 0.8072 y 0.8198 kg de café verde/kg de café pergamino para las variedades Costa Rica, H15 y H16, respectivamente (TABLA 7.3.).

TABLA 9. Rendimiento del Trillado de café.

g de café verde/g de café pergamino		
Costa Rica	H15	H16
0.809±0.001	0.807±0.026	0.819±0.002

Media ± desviación estándar.

Se determinó el rendimiento global del beneficiado de café cereza para la obtención de café verde (FIGURA 7.3.) y se obtuvo un rendimiento global para H15 de 0.087 kg/kg, Costa Rica de 0.081 kg/kg y H16 de 0.073 kg/kg. La variedad H16 mostro menor rendimiento a la variedad H15 y Costa Rica, sin embargo esta diferencia no fue significativa.

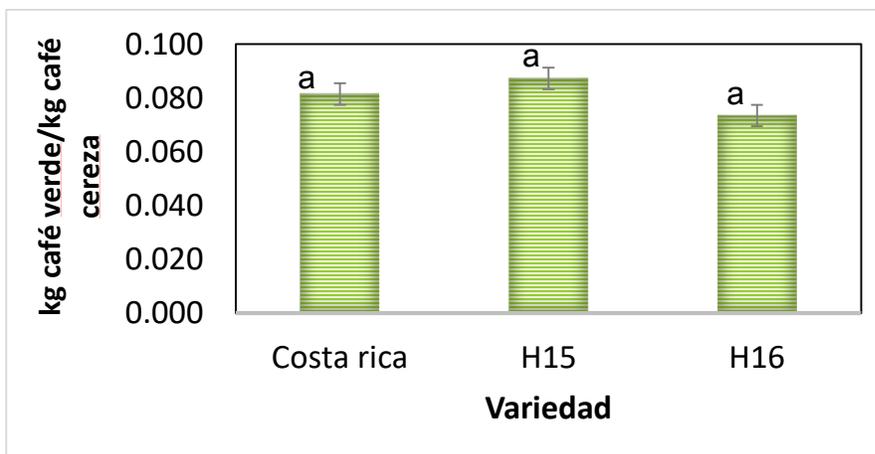


FIGURA 7.3. Rendimiento global del beneficiado de café de la variedad Costa Rica, H15 y H16.

ANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

El grano de café de los 4 lotes evaluados se clasificó en base a tamaño en mallas perforadas con diámetros estandarizados como se muestra en la TABLA 7.4. Teniendo que en todos los lotes el tamaño de grano predominante fue 18/64 y 17/64.

TABLA 10. Granulometría del grano de café verde.

Tamaño de malla	H15	Costa Rica	H16
18/64	0.45±0.03	0.39±0.09	0.37±0.02
17/64	0.26±0.01	0.28±0.01	0.28±0.02
16/64	0.16±0.004	0.17±0.03	0.16±0.005
14/64	0.10±0.01	0.12±0.04	0.16±0.002
13/64	0.01±0.003	0.011±0.007	0.008±0.0005
Otros	0.004±0.001	0.004±0.002	0.002±0.0005

Media ± desviación estándar

7.1.2.1. Propiedades físicas del grano de café verde.

Del grano ya clasificado se tomó una muestra representativa mediante el método de cuarteo a la que se le realizaron análisis Físicos y Químicos, donde se midió densidad, color, defectos, contenido de humedad y grasa.

La densidad calculada para el lote uno de la variedad Costa Rica, H15 y H16 fue de 0.7, 0.691 y 0.694, respectivamente (TABLA 7.5.).

TABLA 11. Densidad del grano de café verde.

Variedad	Densidad
Costa Rica	0.70±0.01
H15	0.69±0.006
H16	0.69±0.0009

Media ± desviación estándar

En cuanto a los parámetros de color medidos (TABLA 7.6.), se determinó que el grano de café verde presenta un color verde claro medio, el cual indica que hasta el momento no ha sufrido cambios importantes en el almacenamiento.

TABLA 12. Parámetros de color del grano de café verde.

Variedad	L*	a*	b*	C*	h
Costa Rica	78.71±1.43	-1.84±0.49	11.27±0.34	11.32±0.41	99.31±2.73
H15	79.71±2.89	-1.85±0.12	11.35±0.72	11.50±0.70	99.30±1.19
H16	79.91±1.15	-1.69±0.13	12.23±0.05	12.34±0.04	97.87±0.71

Media ± desviación estándar.

Por otro lado, se determinó el porcentaje de defectos para las tres variedades de café y se obtuvo que un 7.82 % de la masa total del grano de café, representa a la cantidad de defectos totales en la variedad Costa Rica (TABLA 7.7.). También se encontró que el porcentaje de defectos ocasionados por el procesamiento (partido, pergamino, brocado y cáscara seca) para esta variedad fue de 0.85 %, lo que indica que la etapa de despulpado y trillado, no afectaron la integridad del grano.

TABLA 13. Defectos físicos en café verde de la variedad Costa Rica.

Tipo de defecto	Costa Rica
	Fracción Masa (%)
Grano sano	92.15±0.49
Café (agrio)	3.73±0.73
Elefante	0.54±0.13
Deforme (concha)	2.51±0.30
Partido	0.33±0.26
Roto por despulpadora	0.49±0.13
Pergamino	0.03±0.01
Brocado	0.19±0.11
Cascara seca	0
Negro	0
Inmaduro	0.03
Total	100

Media ± desviación estándar.

Del mismo modo, se encontró que para la variedad H15 los defectos totales corresponden a un 9.35 % del peso del grano (TABLA 7.8.). Dicha diferencia de defectos totales con respecto a la variedad H15 es ocasionada principalmente por el mayor cantidad de granos conocidos como deforme (concha), ya que su presencia aumenta también el porcentaje de defectos como elefante, roto por despulpadora y partido, puesto que su forma característica de “concha” es susceptible a ser dañada en el beneficiado de café.

TABLA 14. Defectos físicos en café verde de la variedad H15.

Tipo de defecto	H15
	Fracción Masa
Grano sano	90.65±0.01
Café (agrio)	3.70±0.37
Elefante	0.49±0.14
Deforme (concha)	3.25±0.11
Partido	0.94±0.37
Roto por despulpadora	0.68±0.20
Pergamino	0
Brocado	0.12±0.06
Cascara seca	0.02±0.005
Negro	0.02±0
Inmaduro	0.08±0
Total	100

Media ± desviación estándar

La variedad H16, obtuvo un porcentaje de defectos totales de 13.89 %, cuyo valor es el mayor entre las variedades estudiadas. Esto es consecuencia del porcentaje de café agrio que se encontró en esta variedad (TABLA 7.9.) y es atribuido a que esta variedad fue más susceptible a la etapa de fermentación y secado, aun cuando se dio el mismo tratamiento a todas las variedades. Cabe mencionar que este defecto es causado por el ataque de hongos Xerofílicos en procesos de fermentación y secado largos.

TABLA 15. Defectos físicos en café verde de la variedad H16.

Tipo de defecto	H16
	Fracción Masa
Grano sano	86.11±0.01
Café (agrio)	11.96±0.61
Elefante	0.25±0.11
Deforme (concha)	0.82±0.15
Partido	0.38±0.09
Roto por despulpadora	0.34±0.12
Pergamino	0.04±0.02
Brocado	0.05
Cascara seca	0
Negro	0.02
Inmaduro	0
Total	100.00

Media ± desviación estándar

7.2. Composición Química

Una vez que se clasificó y determinó las propiedades físicas del grano de café verde. Se retiraron los granos con defectos de cada variedad para que los resultados obtenidos no fueran debido a los defectos del grano de café o una desuniformidad de tamaño del grano, sino a la variedad y el proceso de tostado mismo.

La composición química determinada fue el contenido de humedad, lípidos totales, ácidos grasos y cafestol en café verde.

7.2.1. Contenido de humedad del café verde

Se determinó el contenido de humedad del grano de café verde (FIGURA 7.4.), encontrando diferencia significativa del contenido de humedad que presenta la variedad Costa rica con respecto a la variedad H15 y H16 2. Dicha diferencia se puede atribuir a la variabilidad de las condiciones ambientales que se dieron en los días en los que se llevó el secado como se muestra en la FIGURA 7.2.

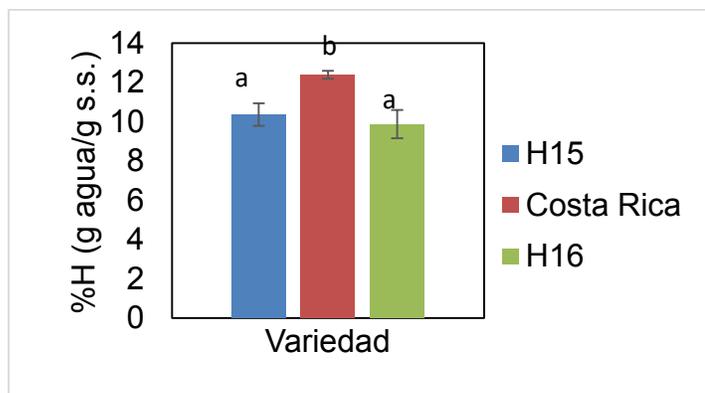


FIGURA 7.4. Contenido de humedad del grano de café verde.

ANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

7.2.2. Contenido de lípidos en el grano de café verde

El contenido de lípidos totales mostró diferencia significativa en las tres variedades de café (FIGURA 7.5.). Sin embargo este contenido tendió a los valores característico a la variedad robusta que según Speer & Kölling-Speer (2006) en promedio presenta un 10 % de lípidos totales. Por otro lado, Ramírez-Hernández (2017), encontro que la variedad híbrido de Timor F1 contiene mayor cantidad de esta fracción con respecto a una variedad Typica, lo que sugiere que esta variedad presento la alta cantidad de lípidos característica de la variedad Typica.

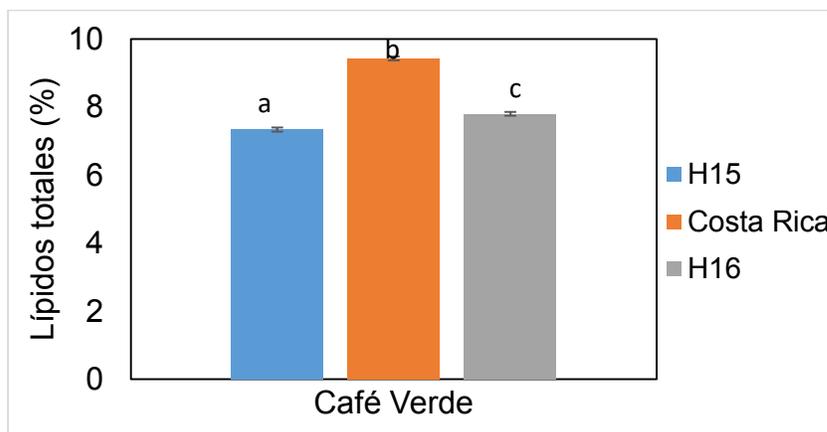


FIGURA 7.5. Contenido de lípidos totales en el grano de café verde.

ANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11), resultados expresados en base seca.

7.2.3. Contenido de ácidos grasos esterificados en el grano de café verde

Se determinó el perfil de ácidos grasos esterificados del grano de café verde en las variedades de estudio (FIGURA 7.6.), el cual, está compuesto por ácido palmítico (C16:0), ácido esteárico (C18:0), ácido oleico (C18:1), ácido linoleico (C18:2), ácido araquídico (C20:0), ácido linolénico (C18:3), ácido behénico (C22:0) y ácido lignocérico (C24:0). Los ácidos grasos mayoritarios fueron el ácido palmítico y el linoleico (en promedio un 33 y 48 %, respectivamente), mientras que el ácido behénico y lignocérico (0.70 y 0.30 %, respectivamente), presentaron la menor fracción relativa del perfil de ácidos grasos.

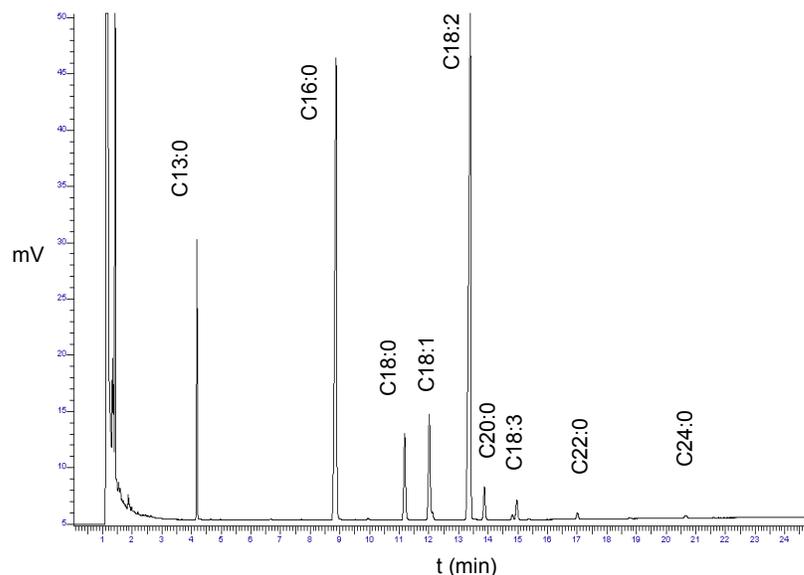


FIGURA 7.6. Cromatograma de los ácidos grasos esterificados en grano de café verde en cromatografía de gases empleando como estándar interno ácido tridecanoico.

El perfil de ácidos grasos de las variedades de estudio (TABLA 7.10.), solo mostró diferencia significativa en la fracción relativa correspondiente al ácido linoleico. También se encontró que el perfil de ácidos grasos de las variedades evaluadas, tendió al presentado por Speer y Kölling-Speer (2006) para *C. arabica* L.

TABLA 7.10. Perfil de ácidos grasos de las variedades de estudio en café verde.

Variedad	Ácido palmítico (C16:0 %)	Ácido esteárico (C18:0 %)	Ácido oleico (C18:1 %)	Ácido linoleico (C18:2 %)	Ácido araquídico (C20:0 %)	Ácido linolénico (C18:3 %)	Ácido behénico (C22:0 %)	Ácido lignocérico (C24:0%)
H15	34.64±0.63 ^a	6.0±0.13 ^a	7.34±0.90 ^a	47.68±0.10 ^a	2.30±0.52 ^a	0.86±0.31 ^a	0.77±0.31 ^a	0.38±0.29 ^a
Costa Rica	33.40±0.36 ^a	5.96±0.33 ^a	5.89±0.10 ^a	49.25±0.25 ^b	2.87±0.10 ^a	1.60±0.25 ^a	0.74±0.13 ^a	0.268±0.24 ^a
H16	32.67±0.71 ^a	6.16±0.18 ^a	7.25±0.09 ^a	50.46±0.41 ^c	1.93±0.23 ^a	0.70±0.85 ^a	0.48±0.11 ^a	0.32±0.10 ^a
C. arabica	26.6-27.8	5.6-6.3	6.7-8.2	52.2-54.3	2.6-2.8	2.2-2.6	0.5-0.6	0.2-0.4

ANOVA; Medias (n=2) ± desviación estándar seguidas de diferente letra en la misma columna son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

Del mismo modo se cuantificaron los ácidos grasos del grano de café, lográndose observar que este contenido es no tiene el mismo comportamiento que respecto al perfil de ácidos grasos. Puesto que, en principio este varía de acuerdo al contenido de lípidos totales del grano de café y como se observó anteriormente (FIGURA 7.5.), este fue diferente significativamente en cada variedad. Por otro lado, la cantidad de ácidos grasos individuales también difieren de la proporción mostrada en el perfil de ácidos grasos (TABLA 7.11.), teniendo que el ácido linoleico mostró no tener diferencia significativa en H15 y Costa Rica, el behénico en H15 y H16 y el lignocérico en H15 y Costa Rica. Mientras que el contenido del resto de los ácidos grasos fue diferente significativamente.

TABLA 16. Contenido de ácidos grasos esterificados en café verde.

Ácido graso	H15	Costa rica	H16
	mg/100 g*	mg/100 g*	mg/100 g*
Ácido palmítico (C16:0)	3157.53±83.24 ^a	3892.99±18.60 ^b	2589.95±18.40 ^c
Ácido esteárico (C18:0)	547.18±16.87 ^a	770.40±32.73 ^b	569.97±4.33 ^c
Ácido oleico (C18:1)	609.46±7.52 ^a	688.46±6.28 ^b	631.47±4.06 ^c
Ácido linoleico (C18:2)	4762.75±732.66 ^a	5057.19±171.60 ^a	3220.60±40.07 ^c
Ácido araquídico (C20:0)	238.33±9.47 ^a	340.29±1.82 ^b	209.85±7.43 ^c
Ácido linolénico (C18:3)	144.53±2.21 ^a	158.80±9.39 ^b	104.71±4.28 ^c
Ácido behénico (C22:0)	40.99±0.77 ^a	73.37±2.56 ^b	37.89±8.99 ^a
Ácido lignocérico (C24:0)	17.48±1.92 ^a	14.30±5.12 ^a	29.92±0.61 ^c
Total	9518.25± 854.65 ^a	10995.79± 248.10 ^b	7394.37± 88.17 ^c

* Base seca

ANOVA; Medias (n=2) ± desviación estándar seguidas de diferente letra en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

7.2.4. Contenido de cafestol en café verde

La variedad H16 fue diferente significativamente en el contenido de cafestol respecto a la variedad H15 y Costa Rica (FIGURA 7.7.). Sin embargo, H15 y Costa Rica no mostraron diferencia significativa en este parámetro. Esto se debe a que las variedades H15 y Costa Rica provienen de un híbrido de timor y el H16 no, lo que supone que estas variedades están expresando el contenido de cafestol de acuerdo al híbrido de timor.

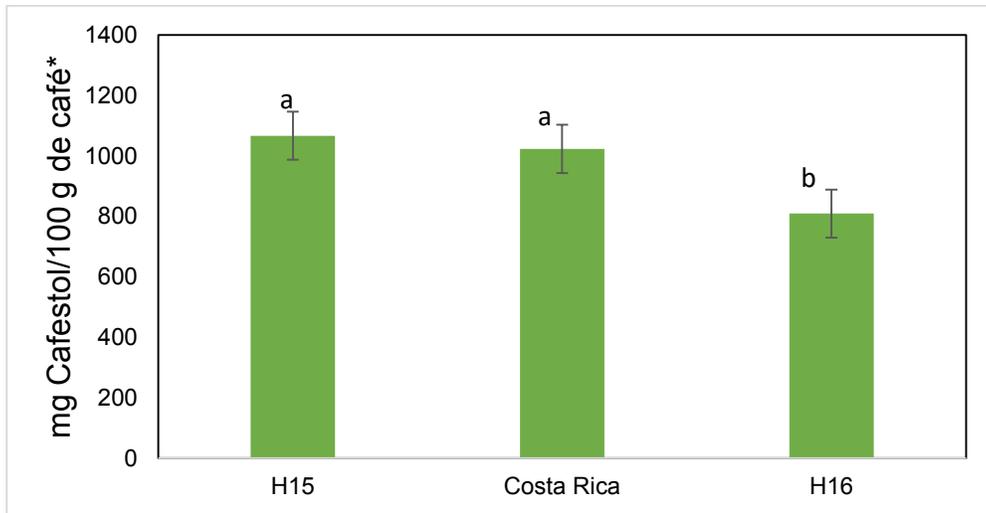


FIGURA 7.7. Contenido de cafestol en las variedades de estudio.

* Base seca

ANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

7.3. Tostado del grano de café

Se aplicaron los tratamientos térmicos definidos en la TABLA 6.3., obteniendo la pérdida de masa y aumento de volumen que resulto de la aplicación de cada tratamiento térmico en el proceso de tostado.

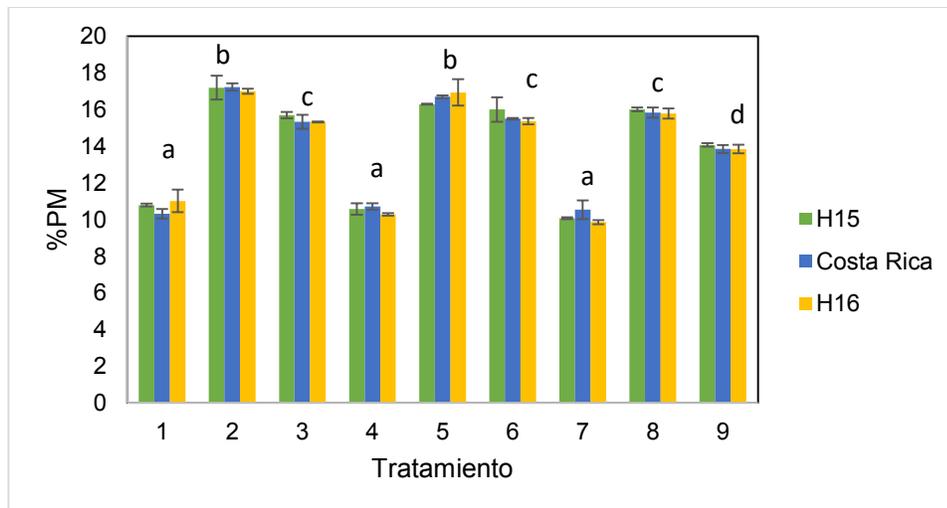


FIGURA 7.8. Pérdida de masa de cada variedad por el proceso de tostado.

MANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

Respecto al parámetro pérdida de masa durante el tostado no hubo diferencia significativa en los tratamientos térmicos de acuerdo a la variedad que fue tostada. Por otro lado, es evidente el efecto del tratamiento térmico en la pérdida de masa FIGURA 7.8., puesto que el tratamiento 1, 4 y 7 perdieron mayor porcentaje de masa en el tostado con un promedio de 10.70; 10.52 y 10.15%, respectivamente. Mientras que los que provocaron mayor pérdida de masa fueron los tratamientos 2 (17.13%) y 5 (16.63%). Los valores alcanzados por los tratamientos 3 (15.44%), 6 (15.61%) y 8 (15.87%), son muy cercanos a los tratamientos 2 y 5, sin embargo se encuentra diferencia significativa con estos últimos, al igual que con el tratamiento 9.

En la FIGURA 7.9, se logra observar un efecto por el tratamiento térmico sobre el aumento de volumen del grano de café en el proceso de tostado, similar al efecto observado a la pérdida de masa mostrado en la FIGURA 7.8. Donde se visualiza la formación de 4 grupos. En los cuales se tiene un aumento de volumen bajo (tratamientos 1: 38.99%, 4: 41.56% y 7:41.91%) medio (3: 49.04%, 6: 49.37% y 8: 50.82%), alto (2: 52.58% y 5: 52.71%) y el tratamiento 9 (48.21%) nuevamente sobre sale de los demás grupos. Esto nos habla de la severidad del proceso de tostado que ejercen los tratamientos 2 y 5.

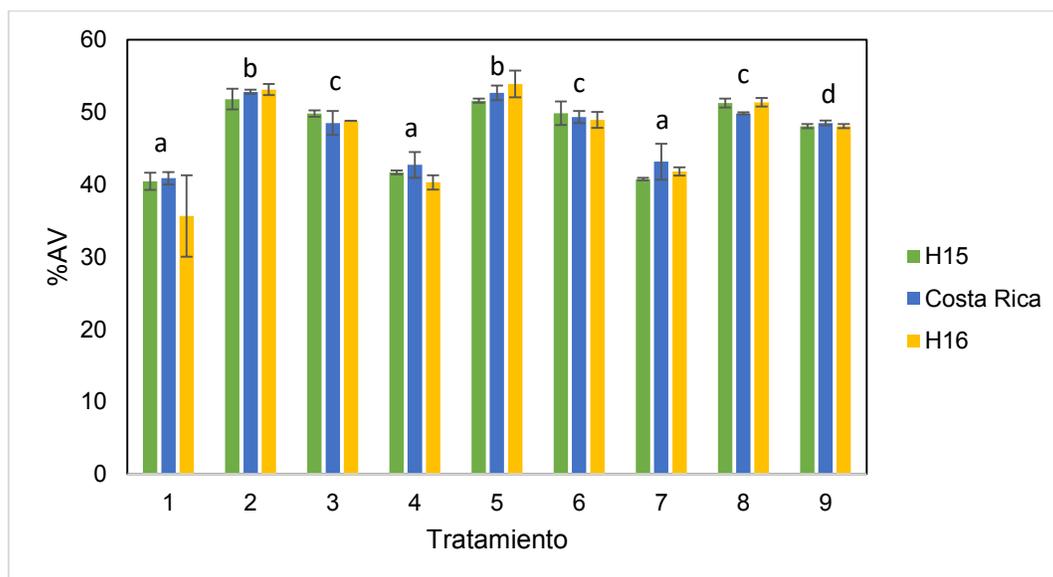


FIGURA 7.9. Aumento de volumen en el proceso de tostado.

MANOVA; Medias ($n=2$) \pm barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

El efecto del parámetro L^* de acuerdo al tratamiento térmico (FIGURA 7.10.), muestra que los tratamientos 2, 3, 5, 6, 8 y 9, fueron los tostados más severos con respecto a este parámetro, originando un color con tendencia a oscuro en el grano de café. Por el contrario, los tratamientos 1, 4 y 7 generaron un color con tendencia al blanco, lo que indica tendencia a un grado de tostado claro.

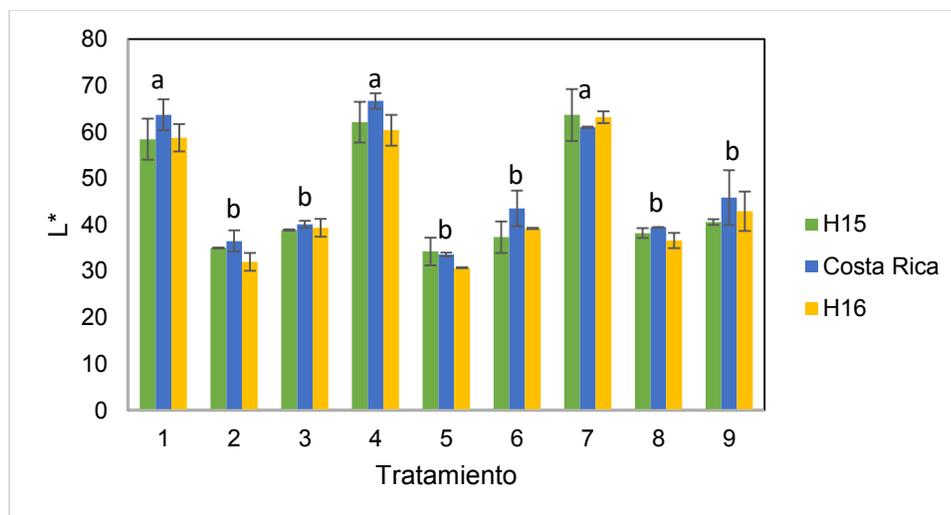


FIGURA 7.10. Efecto del tratamiento térmico en el tostado sobre el parámetro L^* . MANOVA; Medias ($n=2$) \pm barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

El comportamiento del parámetro a^* (FIGURA 7.11.) muestra que los tratamientos 1, 4 y 7, resultaron en un color “café claro” y los tratamientos 2, 5 y 8 tuvieron mayor impacto produciendo un color “café rojizo” confundándose estadísticamente con los tratamientos 3 y 6, excepto con el tratamiento 9.

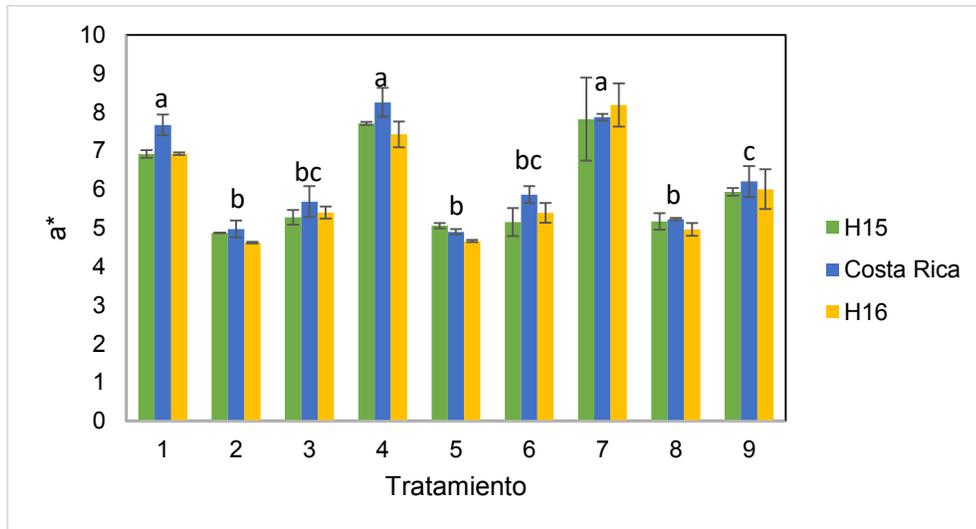


FIGURA 8.11. Efecto del tratamiento térmico sobre el parámetro a* MANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

En el parámetro b* (FIGURA 7.12.), se observa que los tratamientos 1, 4 y 7 tienden al color “amarillo claro”, mientras que el 2, 5 y 8 a un “amarillo oscuro” en este parámetro solo se confunde estadísticamente el tratamiento 6, el cual a su vez no tiene diferencia significativa con el tratamiento 9.

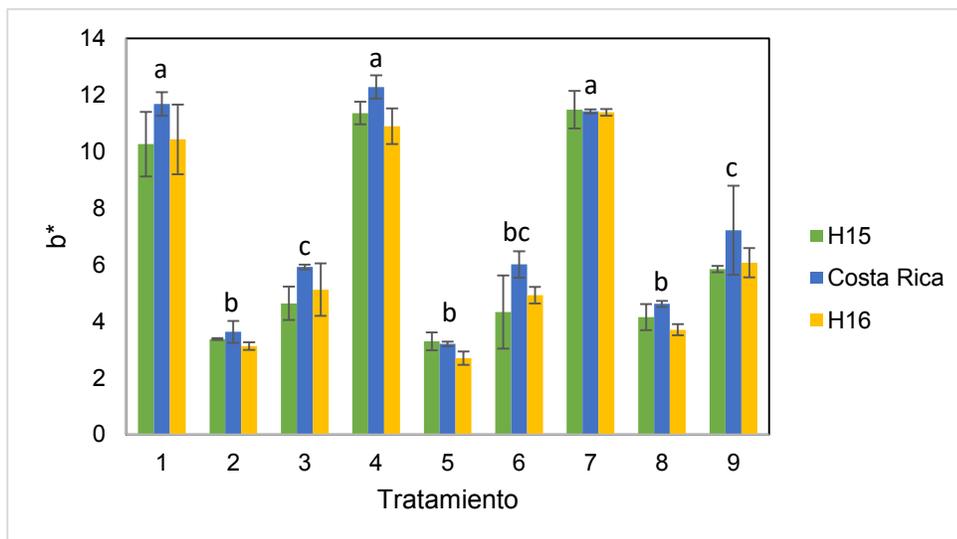


FIGURA 7.12. Efecto del tratamiento térmico sobre el parámetro b*. MANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

Resultados y discusión

El parámetro C^* (FIGURA 7.13.), indica el grado de saturación que tiene el color, en otras palabras nos indica la tendencia que siguieron los parámetros L^* , a^* y b^* . Puesto que este parámetro nos indica que los perfiles 1, 4 y 7 (claros) son tostados que dieron colores con una saturación menor a la observada en los tratamientos 2, 5 y 8 (oscuros).

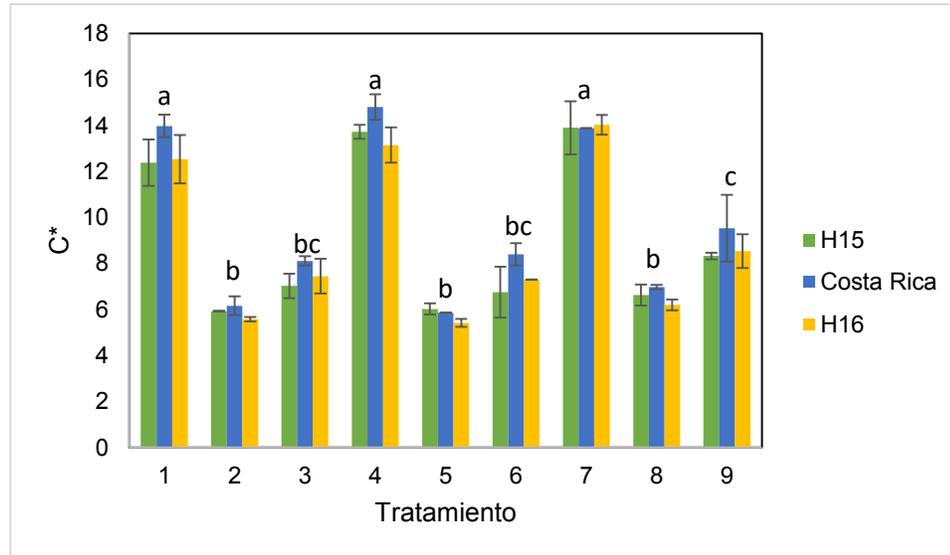


FIGURA 7.13. Efecto del perfil de temperatura sobre el parámetro C^* .

MANOVA; Medias ($n=2$) \pm barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

El ángulo matiz (h^*), puede tener un valor de $0-360^\circ$ comenzando en la escala de color en el parámetro a^* y de acuerdo a este valor se obtiene un tono de color el cual corresponde a rosado en 0° , rojo en 45° y amarillo en 90° . Entonces es entre estas coordenadas en las que varía el color obtenido en cada tratamiento (FIGURA 7.14.). Por lo que mientras más alto es este valor (tratamientos 1, 4 y 7) se observa una tendencia del rojo al amarillo, resultando en un color “anaranjado”. En cuanto a los tratamientos 2 y 5 tienen dirección del rojo al rosado y los tratamientos 3, 6, 8 y 9, se encuentran en el tono rojo.

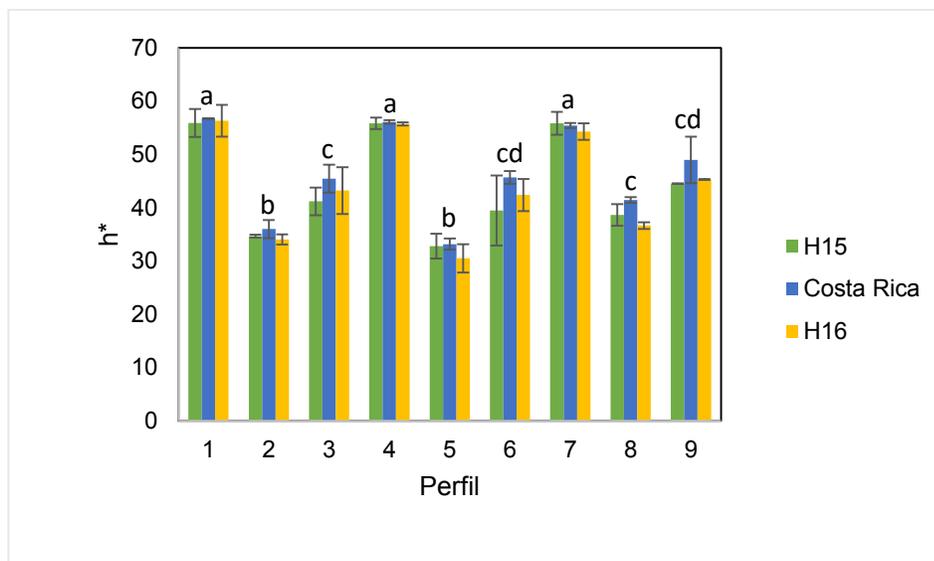


FIGURA 7.14. Efecto del tratamiento térmico sobre el parámetro h^* .

MANOVA; Medias ($n=2$) \pm barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

De acuerdo a los parámetros % pérdida de masa, % aumento de volumen y color se formaron 3 grupos con base al tratamiento térmico aplicado (TABLA 7.12.), variando en estos la intensidad de flama aplicada en la temperatura de cambio de flama y final. Teniendo que el grupo “A” origino 3 tostados medios claros (LM), el grupo “B” 3 tostados oscuros (D) y el grupo “C” 2 tostados oscuros y 1 medio oscuro (MD). Lo que sugiere, que el tratamiento nueve al ser tratado a las mismas temperaturas que el tratamiento 3 y 6, pero al provenir de una temperatura de precalentamiento a una intensidad de flama alta a media, la razón de calor aplicado fue mayor, lo que, provoco un grado de tostado mayor a los tratados con el mismo tratamiento térmico, pero diferente intensidades de flama.

TABLA 17. Tratamientos térmicos agrupados de acuerdo a la temperatura aplicada.

Grupo	Tratamiento	T (°C)	Intensidad de flama		Nivel de tostado*
			Tc	Tf	
A	1	240	Media	Baja	LM ¹
	4	190	Baja	Alta	LM
	7	200	Alta	Media	LM
B	2	230	Media	Baja	D ²
	5	180	Baja	Alta	D
	8	215	Alta	Media	D
C	3	220	Media	Baja	D
	6	200	Baja	Alta	D
	9	207	Alta	Media	MD ³

¹ claro medio, ² oscuro y ³ medio oscuro; * escala Agron.

El tostador automatizado provisto por el laboratorio de Tecnología del café en UNIDA, permite monitorear en tiempo real la evolución del tostado, obteniendo así los tiempos totales de tostado promedio (FIGURA 7.15.). El tiempo de tostado muestra una alta variabilidad entre perfiles de temperatura, incluso en el mismo tratamiento de tostado. Debido a que este no fue un parámetro que se controlara directamente, puesto que este dependió de las condiciones ambientales que se dieron en el momento del tratamiento térmico. Sin embargo, se observa una tendencia que se dio de acuerdo a los tratamientos de acuerdo a las condiciones aplicadas en el proceso de tostado como en el tratamiento 1 donde se observan tiempos de tostado mayores, lo que se atribuye al tratamiento, ya que se aplicó una temperatura final baja, lo que aumento el tiempo de tostado y en el tratamiento 9 se aplicó una temperatura final media, pero de una intensidad de flama en la temperatura de cambio de flama a final de alta a media, respectivamente, esto afecto directamente al tiempo de tostado, por lo que se registró en este tratamiento el menor tiempo de tostado.

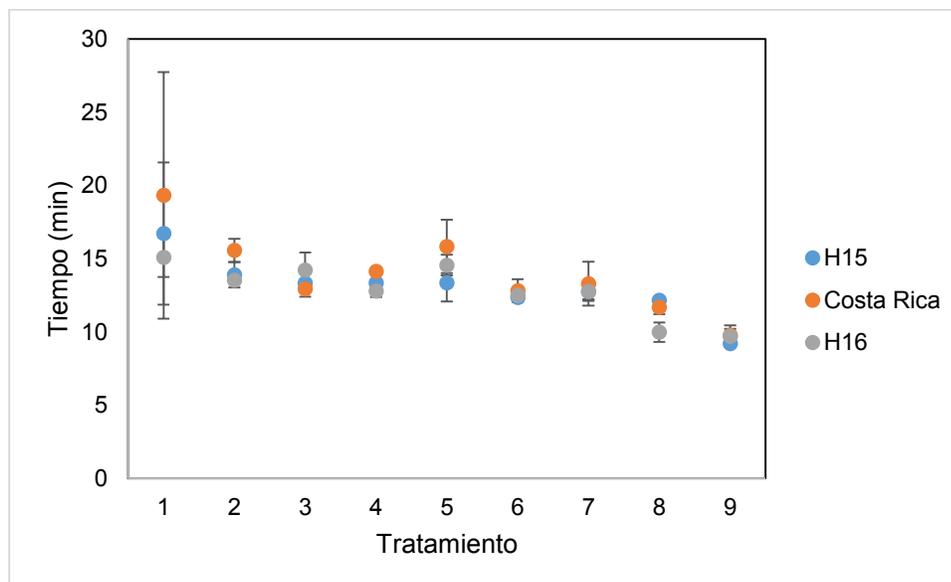


FIGURA 7.15. Tiempo de tostado de acuerdo al perfil de temperatura.

Las condiciones climatológicas temperatura y porcentaje de humedad relativa del aire fueron medidas con un Onset HOBO® Data Logger UX100-003 (FIGURA 7.16). Obteniendo así, dichas variables a lo largo del proceso de tostado. En donde, se muestran diversas fluctuaciones respecto a las variables de estudio, debido a los cambios de temperatura y porcentaje de humedad relativa provistos por el fenómeno del día y la noche. Además, de las variaciones debidas a que el proceso de tostado se llevó a cabo en un entorno en el cual existía la entrada y salida de aire del centro de investigación. Por otro lado, el patrón de las condiciones ambientales en los días que se realizó el proceso de tostado, siguió el mismo comportamiento. Cabe mencionar que para minimizar el efecto de las condiciones ambientales el orden de tostado se llevó de manera aleatoria por variedad como se muestra en la FIGURA 7.16.

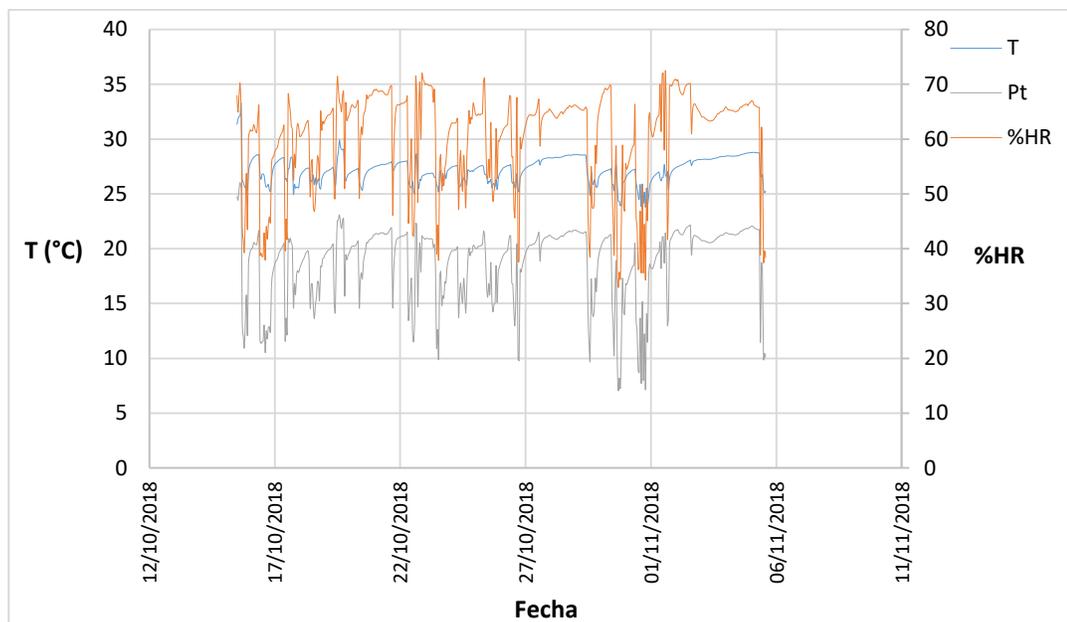


FIGURA 7.16. Condiciones climatológicas en el proceso de tostado.

7.4. Efecto del tostado en la fracción lipídica del grano de café

Se evaluó el contenido de lípidos en el café tostado sometido a los nueve tratamientos térmicos (FIGURA 7.17.), encontrando que no hubo diferencia significativa en el contenido de grasa en el café tostado por variedad, pero si hubo diferencia significativa con respecto al tratamiento aplicado. En el proceso de tostado se observó un efecto de concentración y liberación del contenido de lípidos totales en el grano de café, encontrando que en los tostados claros (grupo A), hubo una cantidad menor (11.52-11.9 %) a los tostados oscuros del grupo B (14.02-14.89 %) y grupo C (13.21-13.73 %). Este efecto se atribuye a que en los tostados claros se aplicó una temperatura de precalentamiento mayor lo que ocasionó que el grano de café se tostara a mayor velocidad, lo que afectó la permeabilidad de la capa superficial del grano, provocando una disminución de la migración de lípidos al exterior del grano de café, lo que repercutió en una menor disponibilidad de los lípidos extraíbles durante el proceso de obtención de extracto etéreo.

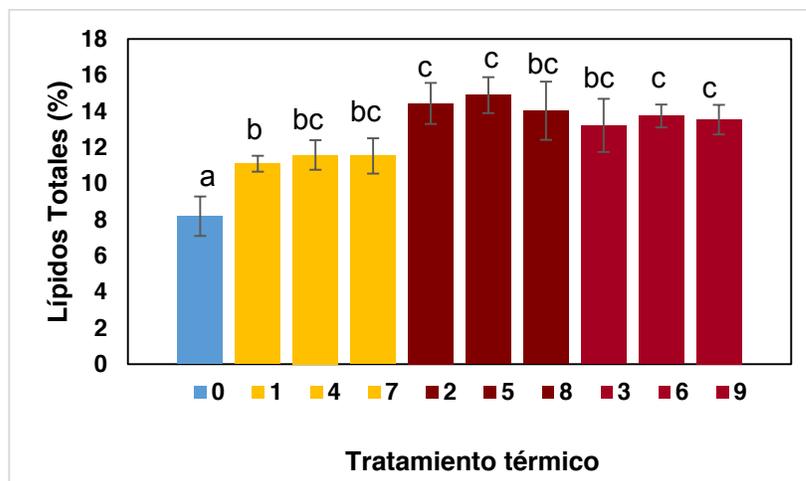


FIGURA 7.17. Efecto del tratamiento térmico en el contenido de lípidos del café. MANOVA; Medias (n=2) ± barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

En cuanto al perfil de ácidos grasos esterificados, no se encontró un efecto con respecto a la variedad o los tratamientos térmicos (FIGURA 7.18.), lo que concuerda con Budryn *et al.* (2012). Sin embargo, si se observó un efecto de aumento de la fracción correspondiente al ácido palmítico y disminución de los ácidos linoleico, behénico y lignocérico.

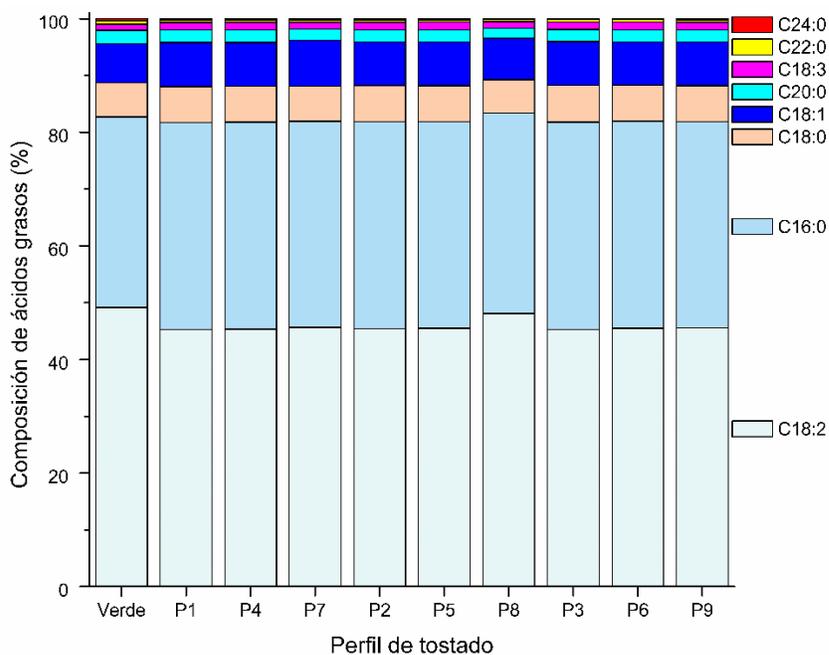


FIGURA 7.18. Efecto del tratamiento térmico sobre el perfil de ácidos grasos.

Resultados y discusión

El contenido de ácidos grasos del grano de café mostró una respuesta de acuerdo al tratamiento térmico aplicado y no se encontró diferencia significativa entre variedades. Donde el C16:0 no mostró diferencia significativa entre perfiles (FIGURA 7.19. A), pero si en los tratamientos 1, 4 y 9 con respecto al café verde (tratamiento 0). Lo que se atribuye a que en los tratamientos 1 y 4, el contenido de lípidos fue menor (FIGURA 7.17.) y en el tratamiento 9 fue donde se obtuvieron las condiciones más severas de tostado obteniendo un tostado medio oscuro, lo que afectó en éste y en el resto de ácidos grasos. Del mismo modo en los ácidos grasos C18:0, C18:1 y C18:2 no se encontró diferencia significativa entre tratamientos. Teniendo que el contenido de C18:0 difirió del café verde en los tratamientos claros (1 y 4) y en el 2, 3 y 9. Este comportamiento se explica por el menor contenido de lípidos que se encontró en los tostados claros, mientras que en el tratamiento 9, ya se ha mencionado su efecto de mayor severidad y en cuanto al tratamiento 2 y 3, se puede atribuir a que en estos la t_f aplicada fue mayor a la de los tostados claros y además la intensidad de flama en t_c y t_f fue de media a baja lo que aumento el tiempo de tostado afectando significativamente el contenido de este ácido graso.

Por otro lado, el contenido de C18:1 no reflejo diferencia significativa en el proceso de tostado ni con el café verde. Se determinó que el contenido de C18:2 solo mostró diferencia significativa en los tratamientos 4 y 9 con respecto al café verde. Sin embargo, esto muestra un efecto interesante, puesto que, mientras su fracción relativa mostró un efecto de disminución en el proceso de tostado, el contenido sólo muestra diferencia significativa en dos tratamientos. Esto se atribuye a que en el proceso de tostado se observó un incremento del contenido de lípidos totales, el cual mostró diferente tendencia de incremento entre tratamientos, pero solo tuvo diferencia significativa en el 1.

Resultados y discusión

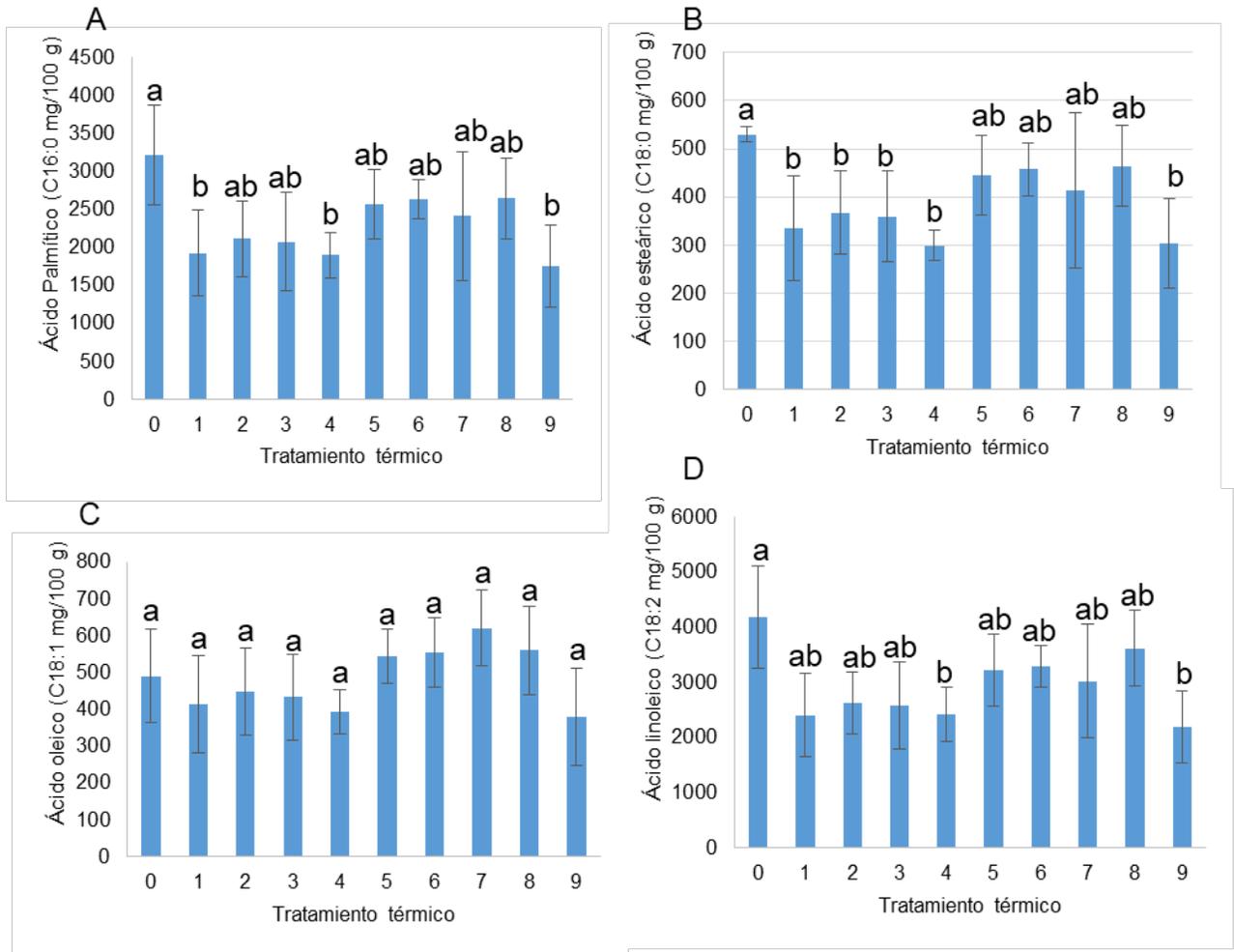


FIGURA 7.19. Efecto del tratamiento térmico en el contenido de ácidos grasos esterificados C16-C18:2.

Donde A= contenido de C16:0; B= contenido de C18:0; C= contenido de C18:1 y C18:2 de acuerdo al tratamiento térmico.

MANOVA; Medias ($n=2$) \pm barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

En cuanto al contenido de C20:0, este mostró menor diferencia sólo en los tratamientos 2, 4, 7 y 9 con respecto al café verde (FIGURA 7.20. A). Esto es debido, a que los tratamientos 4 y 7, pertenecen al grupo "A" los cuales produjeron tostados con menor contenido de lípidos, además que estos difieren del 1, porque en estos se aplicaron intensidades de flama en la tc y tf de baja a alta y de alta a media, respectivamente. Lo que indica que el calor aplicado fue a una razón mayor a la del tratamiento 1, provocando mayor efecto de disminución de este ácido graso. El

contenido de C18:3, mostro un efecto de disminución en los tratamientos 1, 2, 3, 4, 7 y 9, sin embargo este no fue significativo con respecto al contenido de este en café verde.

Se observó una tendencia de disminución del C22:0, la cual sólo fue significativa en el tratamiento 7 y 9. Esto efecto está directamente relacionado con la temperatura de precalentamiento y la intensidad de flama, ya que, en el 7 que rindió un grado de tostado claro medio se aplicó una tp alta y una intensidad de flama en tc y tf de alta a media, lo que provocó una menor migración de los lípidos a la parte superficial del grano y además que el calor aplicado en la temperatura final fuera a una razón alta. Lo que impacto, en el contenido de este ácido graso. Por último, el C24:0 sufrió una disminución significativa en todos los tratamientos térmicos respecto al café verde, lo que, no sugiere un efecto de los diferentes tratamientos térmicos, pero si del proceso de tostado, aun cuando este ácido graso presenta mayor estabilidad por ser saturado y de cadena larga.

Los resultados obtenidos difieren de Jau-Tien *et al.* (2016), quienes encontraron un aumento en el contenido de los ácidos grasos en un tostado a 200 °C del kernel de almendra hasta el minuto 10 y una disminución significativa después de este tiempo. También observaron un aumento del contenido del C16:0 y disminución del C18:2, comportamiento que en este estudio no se observa, ya que el contenido del C16:0 se mantiene relativamente estable excepto en el tratamiento 1, 4 y 9 donde se encontró una disminución significativa de este ácido graso, mientras que el C18:2 disminuyó significativamente en los tratamientos 4 y 9. Es importante considerar que en el proceso de tostado en tambor rotatorio empleado se alcanzaron temperaturas mayores a las que se llevó en el tostado realizado por Jau-Tien *et al.*, (2016), lo que indica, que el uso de un tratamiento térmico con una temperatura de precalentamiento, cambio de flama y final, reduce el tiempo de contacto del grano de café con el tambor rotatorio y que la intensidad de flama influye significativamente debido a que esta es la responsable de aumentar o disminuir la velocidad de transferencia de calor al grano, lo que impacta directamente sobre la fracción lipídica del café.

Resultados y discusión

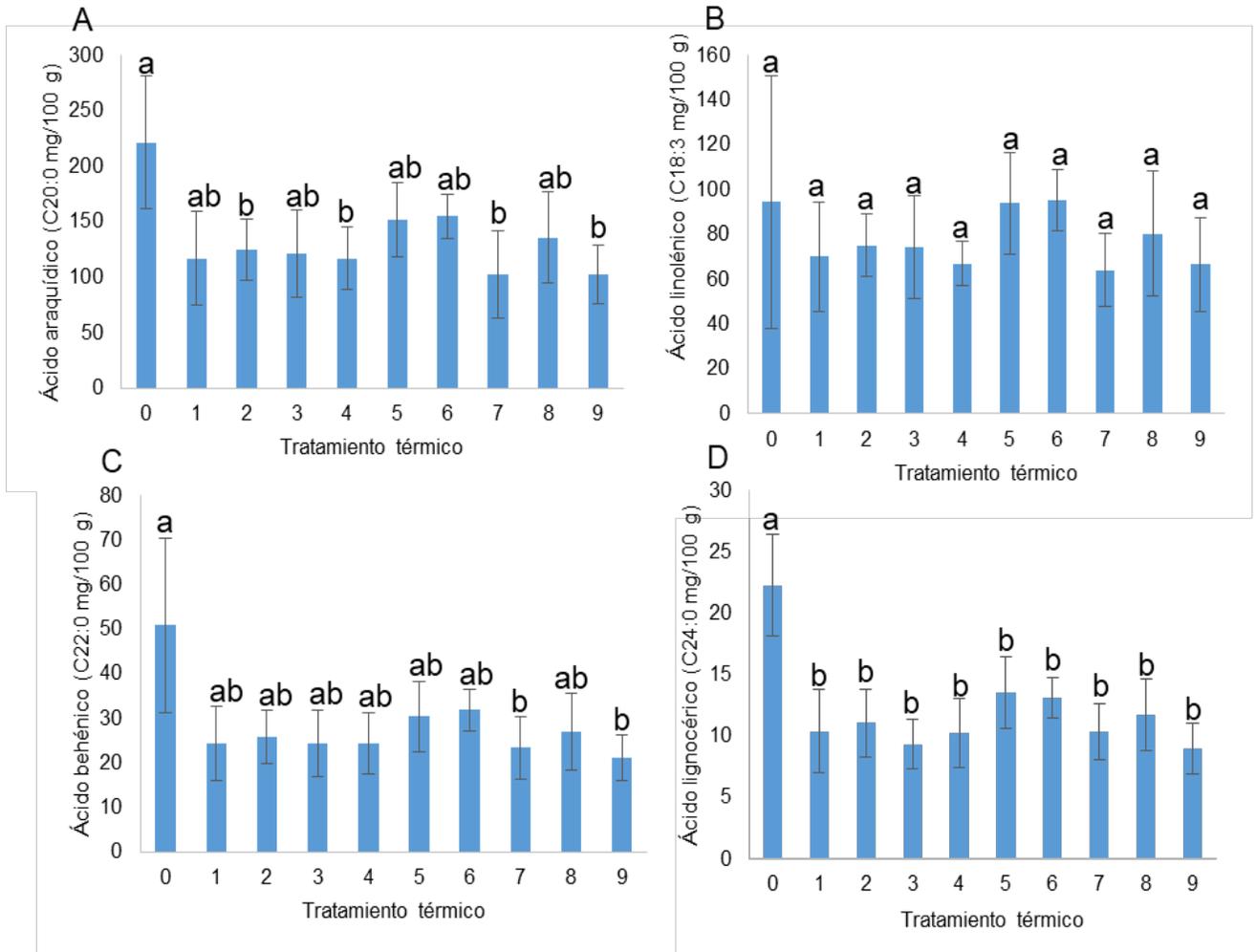


FIGURA 7.20. Efecto del tratamiento térmico en el contenido de ácidos grasos esterificados C20:0-C24:0.

Donde A= contenido de C20:0; B= contenido de C18:3; C= contenido de C22:0 y C24:0 de acuerdo al tratamiento térmico.

MANOVA; Medias ($n=2$) \pm barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

Por último, se determinó el contenido de cafestol de acuerdo al tratamiento térmico (FIGURA 7.21.). Encontrando que la variedad no tuvo efecto en este parámetro en el proceso de tostado, pero si se encontró diferencia significativa entre tratamientos y con respecto al contenido de cafestol en café verde, donde se observó un efecto significativo de disminución de cafestol de café verde a café tostado. Se encontró que en los tostados claros 1, 4 y 7, el efecto de disminución

Resultados y discusión

fue menor que en el resto de los tostados y que en el tratamiento 9 se dió el menor contenido de cafestol. Dicho efecto se relaciona con la *t_f* aplicada en el proceso de tostado, debido a que en el grupo “B” y “C” las *t_f* fueron mayores a la del grupo “A”. Por otro lado, en el tratamiento 9, además de lo anterior, se trató con una intensidad de flama de *t_c* y *t_f* de alta a media, lo que indica que el sistema tuvo una acumulación de energía fuerte desde la *t_c*, provocando que, aunque se trató con flama media en la *t_f*, el tostado se llevó de manera más severa sobre la capa externa del grano y además favoreció la deshidratación del Diterpeno según Eloy-dias *et al.* (2014).

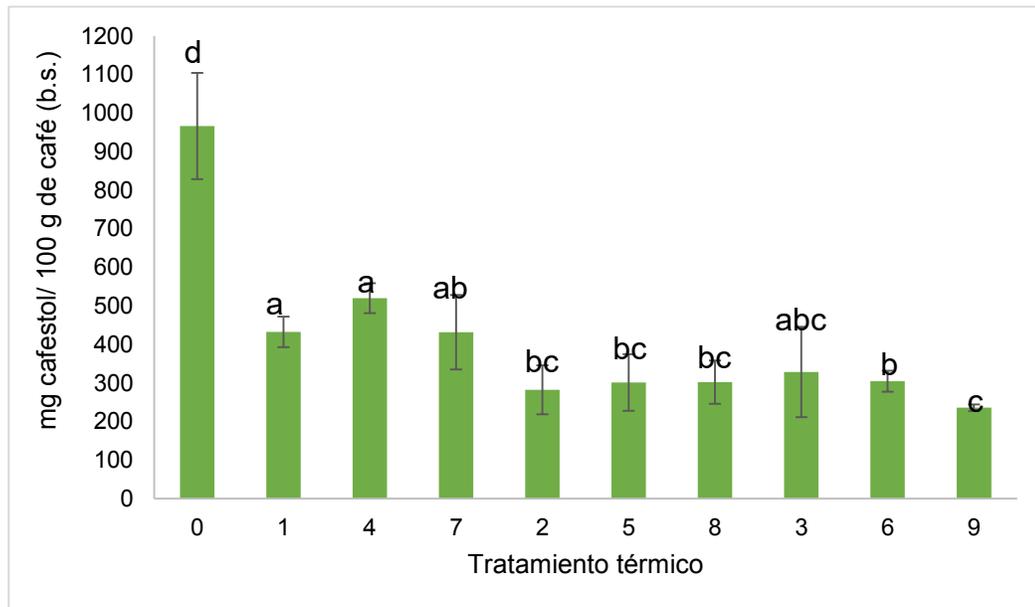


FIGURA 9.21. Efecto del tratamiento térmico en el tostado sobre el contenido de cafestol.

MANOVA; Medias ($n=2$) \pm barras de error seguidas de diferente letra son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$; NCSS11).

8. Conclusiones

Las variedades híbridas H15 (Mundo Mex) y H16 (Mundo Maya), mostraron menor contenido de lípidos (7.34 y 7.8%, respectivamente) con respecto a la variedad tradicional Costa Rica (9.42%), en café verde.

Los Ácidos grasos esterificados en café verde (C16:0, C18:0, C18:1, C20:0, C18:3, C22:0 y C24:0), mostró diferencia significativa entre variedades solo en la fracción relativa correspondiente a C18:2 (H15: 47.68; Costa Rica: 49.25 y H16: 50.46%).

El perfil de Ácidos grasos esterificados en café verde (C16:0, C18:0, C18:1, C20:0, C18:3, C22:0 y C24:0), mostró diferencia significativa en el contenido de C18:2 y C24:0 en las variedades H15 y Costa Rica (4762- 5057 mg/100 g), respecto a la variedad H16 (3220.60 mg/100 g) y el contenido de C22:0 en las variedades H15 y H16 (40.99-37.89 mg/100 g) fue menor respecto a la variedad Costa Rica (73.37 mg/100 g). Diferencia que se atribuye a la expresión de la carga genética para cada variedad con respecto al contenido de ácidos grasos.

El contenido de cafestol en café verde en la variedad H16 (809.32 mg/100 g), fue significativamente menor a la concentración en las variedades Costa Rica y H15 (1023.2 y 1066.64 mg/100 g, respectivamente).

El contenido de lípidos totales del café tostado tuvo un incremento significativo en los tratamientos de tostados oscuros (13.21-14.89%), respecto a los perfiles de tostados claros (11.52-11.9%). Sugiriendo que la estructura superficial del grano redujo su permeabilidad y disminuyó la migración de lípidos al exterior del grano, debido a que la temperatura de precalentamiento fue mayor en los tostados oscuros.

El tostado de café disminuyó significativamente la fracción relativa del ácido linoleico (C18:2) (49 a 45%) y aumento la del ácido palmítico (C16:0) (33 a 36%) con respecto al café verde.

Conclusiones

El contenido de ácidos grasos del café mostró una disminución significativa solo en los tratamientos que rindieron tostados claros en los ácidos grasos C16:0 (3213 a 1893 mg/100 g), C18:0 (529 a 298 mg/100 g), C20:0 (221 a 101 mg/100 g) y C22:0 (50 a 23 mg/100 g) y en el tratamiento 9 que disminuyó el contenido de C16:0 (3213 a 1749 mg/100 g), C18:0 (529 a 304 mg/100 g), C18:2 (4180 a 2196 mg/100 g), C20:0 (221 a 102 mg/100 g), C22:0 (50 a 21 mg/100 g), y C24:0 (22 a 8 mg/100 g). Lo que sugiere que la temperatura de precalentamiento a 240 °C y el empleo de una intensidad de flama alta en la temperatura de cambio de flama tuvieron un mayor efecto en la degradación de los ácidos grasos.

En general no se encontró un efecto significativo en el contenido de ácidos grasos con respecto al tratamiento térmico, solo en los perfiles 4 y 7, donde fue menor el aumento de lípidos totales debido a la tp y en el tratamiento 9 que aplicó una intensidad de flama en la tc y tf de alta a media, provocando mayor grado de tostado debido a la energía acumulada.

El contenido de cafestol disminuyó en los tostados claros de 966 mg/100 g de café verde a 461 mg/100 g de café tostado y en los tostados oscuros de 966 mg/100 g de café verde a 292 mg/100 g de café tostado. Lo que se atribuye a que en los tostados oscuros la temperatura final fue mayor a la empleada en los tostados claros. Cabe destacar que no se observó diferencia significativa del contenido de cafestol en los tostados oscuros con respecto al cambio de flama.

9. Recomendaciones

Correlacionar la fracción lipídica con la micro estructura del grano de café tostado.

Estudiar la disminución de ácido linoleico (C18:2) y aumento de ácido palmítico (C16:0) en el proceso de tostado.

Analizar la posible formación de las moléculas deshidratadas de diterpenos en el proceso de tostado en tambor rotatorio.

Estudiar la influencia de la fracción lipídica sobre los VOC's en el café tostado.

Evaluar el efecto de la fracción lipídica sensorialmente y aromáticamente en la taza de café.

REFERENCIAS

- Alvarado, M., y Rojas, G. 2007. El cultivo y beneficiado del Café (2nd ed.). Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia. San José, C.R.
- Bhumiratana, N., Adhikari, K., y Chambers IV, E. 2011. Evolution of sensory aroma attributes from coffee beans to brewed coffee. *Food Sci. Technol.* 44(10): 2185-2192.
- Budryn, G., Nebesny, E., Żyżelewicz, D., Oracz, J., Miśkiewicz, K., y Rosicka-Kaczmarek, J. 2012. Influence of roasting conditions on fatty acids and oxidative changes of Robusta coffee oil. *Eur. J. Lipid Sci Technol.* 114(9):1052-1061.
- Cárdenas, M., Marcano, R., Giraldo, H., y Aquino, A. 2007. Biología de la broca del café, *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Curculionidae) bajo condiciones de campo, en el estado Táchira, Venezuela. *Entromotropica.* 22(2):49-55.
- Castro-Gómez, P., Fontecha, J., y Rodríguez-Alcalá, L. 2014. A high-performance direct transmethylation method for total fatty acids assessment in biological and foodstuff samples. *Talanta.* 128:518- 523.
- Davis, A., Govaerts, R., Bridson, D., y Stoffelen, P. 2006. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). *Bot. J. Linn. Soc.* 152(4): 465-512.
- De Oliveira, P., de Almeida, R., de Oliveira, N., Bostyn, S., Gonçalves, C., y de Oliveira, A. 2014. Enrichment of diterpenes in green coffee oil using supercritical fluid extraction – Characterization and comparison with green coffee oil from pressing. *Journal Supercrit Fluids.* 95:137-145.
- Eloy-Dias, R., Faria-Machado, A., Zerlotti-Mercadante, A., Bragagnolo, N., y Benassi, M. 2014. Roasting process affects the profile of diterpenes in coffee. *Eur Food Res Technol.* 239(6):961-970.
- González, H., y González, S. R. 2011. Café (*Coffea arabica* L.): compuestos volátiles relacionados con el aroma y sabor. *U Tecnociencia.* 5(2):35-45.
- Gonzalez-Rios, O., Suarez-Quiroz, M., Boulanger, R., Barel, M., Guyot, B., Guiraud, J., y Schorr-Galindo, S. 2007. Impact of “ecological” post-harvest processing on the volatile fraction of coffee beans: I. Green coffee. *J. Food Compos. Anal.* 20(3-4): 289-296
- Good, C., dos Santos, M., Protasio, L., Esteves, L., Sera, T., y Dias, J. 2013. Diterpenes in green and roasted coffee of *Coffea arabica* cultivars growing in the same edapho-climatic conditions. *J. Food Compos. Anal.* 30(1):52-57.

REFERENCIAS

- Hernández, M. C. 2015. Correlación de Marcadores Químicos y Sensoriales para Café Tostado (*Coffea arabica* L.) a Diferentes Perfiles de Temperatura. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica. Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, México.
- Hurtado-Benavides, A., Dorado, D., y Sánchez-Camargo, A. 2016. Study of the fatty acid profile and the aroma composition of oil obtained from roasted Colombian coffee beans by supercritical fluid extraction. *Journal Supercrit Fluids*. 113:44-52.
- International Coffee Organization. 2017. (Consultado el día 4 de Octubre del 2017), Disponible en: <http://www.ico.org/>
- ISO (1994). Roasted ground coffee -- Determination of moisture content -- Method by determination of loss in mass at 103 degrees C (Routine method). 11294:1994. International Organization for Standardization (Online) 2017, (consultado el día 20 de Octubre del 2017). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/19272.html>.
- Jau-Tien, L., Shih-Chun, L., Chao-Chin, H., Yung-Shing, S., Chia-Ying, H., y Deng-Jye, Y. 2016. Effects of roasting temperature and duration on fatty acid composition, phenolic composition, Maillard reaction degree and antioxidant attribute of almond (*Prunus dulcis*) kernel. *Food Chem*.190:520–528.
- Muñoz-Sanchez, J., y Hernández-Sotomayor, S. 2008. Biotechnology in Coffee Research. *AmJPSB*. 2(2):85-95.
- Nikolova-Damyanova, B., Velikova, R., y Jham, G. 1998. Lipid classes, fatty acid composition and triacylglycerol molecular species in crude coffee beans harvested in Brazil. *Food Res Int*. 31(6-7):479-486.
- NMX-F-013-SCFI-2000. Café puro tostado, en grano o molido, sin descafeinar o descafeinado. Especificaciones y métodos de prueba. Normas mexicanas. Dirección general de normas.
- NMX-F-089-S. 1978. Determinación de Extracto Etéreo (Método Soxhlet) en Alimentos. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas.
- NMX-F-158-SCFI-2008. Determinación de Extracto Etéreo (Método Soxhlet) en Alimentos. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas.
- NMX-F-162-SCFI-2008. Café verde- tabla de referencia de defectos. Dirección General de Normas.
- Ramírez-Hernández, A. K. 2017. Estudio comparativo de la calidad entre una variedad híbrida y una variedad tradicional de la especie *Coffea arabica* L. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica. Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, México.
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. 2016. Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Veracruz. (Consultado el día 28 de Septiembre del 2017), Disponible en <http://cesvver.org.mx/roya-del-cafe-hemileia-vastatrix/>
- Speer, K., y Kölling-Speer, I. 2006. The lipid fraction of the coffee bean. *Braz. J. Plant Physiol*.18(1):201-216.

REFERENCIAS

Sunarharum, W., Willians, D., y Smyth, H. 2014. Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. *Food Res Int.* 62:315-325.

World Coffee Research. 28-Marzo-2016. (Consultado el día 25 de Septiembre del 2017). Disponible en <https://worldcoffeeresearch.org/work/coffee-varieties-mesoamerica-and-caribbean>.