

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA NUTRICIÓN Y ALIMENTOS

TESIS PROFESIONAL

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD
ANTIOXIDANTE DE LA MEZCLA DE CAFÉ
ARÁBICA Y CATIMOR TOSTADO A 200, 215 Y 225 °C

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
ALIMENTOS

PRESENTA

HÉCTOR AQUILES LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR

**DRA. MARÍA EMPERATRIZ DOMÍNGUEZ
ESPINOSA**

ASESOR EXTERNO

DR. MANUEL ALEJANDRO VARGAS ORTIZ

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Junio, 2024



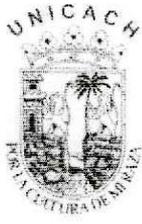
AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, la Dra. María Emperatriz Domínguez Espinosa, expreso mi más sincero agradecimiento por su invaluable apoyo y guía durante todo el proceso de elaboración de esta tesis. Su paciencia, dedicación y conocimiento experto fueron fundamentales para superar los desafíos y alcanzar los objetivos planteados. Agradezco especialmente su confianza en mi trabajo y su constante disposición para brindarme orientación y retroalimentación constructiva.

A mi asesor, Dr. Manuel Alejandro Vargas Ortiz, por su valiosa colaboración en esta tesis. Sus comentarios y sugerencias enriquecieron significativamente mi trabajo y me ayudaron a enfocarlo en la dirección correcta. Agradezco especialmente su disposición para compartir su conocimiento y experiencia conmigo.

A mi madre:

A mi madre, mi pilar fundamental, le expreso mi más profundo agradecimiento por su amor incondicional y apoyo durante toda mi vida. Sus desvelos para que pudiera estudiar por las mañanas y sus palabras de aliento en los momentos difíciles fueron el motor que me impulsó a seguir adelante. Agradezco su infinita fe en mí y su constante motivación para alcanzar mis metas.



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACION ESCOLAR



Autorización de Impresión

Lugar y Fecha: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 13 de mayo de 2024

C. Héctor Aquiles López López

Pasante del Programa Educativo de: Ciencia y Tecnología de Alimentos

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
Evaluación de la capacidad antioxidante de la mezcla de café arábica y catimor

tostado a 200,215 y 225 °C

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Firmas

Mtra. Yadira del Rocío Sánchez Oropeza

Mtro. Mario Alberto Morales Ovando

Dra. María Emperatriz Domínguez Espinosa



COORDINACIÓN
DE TITULACIÓN

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	9
JUSTIFICACIÓN	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
OBJETIVOS	12
General.....	12
Específicos.....	12
MARCO TEÓRICO.....	13
Generalidades del café.....	13
Producción de café en México	13
Producción y variedades que se cosechan en el estado de Chiapas.....	13
Especies de café.....	15
<i>Coffea Arábica</i>	15
<i>Coffea canephora</i>	16
variedades de café.....	16
Variedades descendientes del <i>C. arabica</i>	16
<i>Bourbon</i>	16
<i>Caturra</i>	17
<i>Timor</i>	17
<i>Catimor</i>	17
Composición química de los granos de café	18
Ácidos fenólicos.	19
Polifenoles	20
Compuestos nitrogenados.....	20
Compuestos Bioactivos	21
Antioxidantes	23
Actividad antioxidante	23
Capacidad antioxidante.....	24
Compuestos bioactivos que se generan durante el tostado del café verde	25

Antioxidantes en el café tostado	26
Características del procesamiento del café.....	27
Métodos para determinar la capacidad antioxidante	28
Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid)	28
Método del DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracil).....	28
Método del ABTS (ácido 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolín)-6-sulfónico).....	29
Método FRAP (Reducción del hierro férrico a ferroso).....	29
Fermentación	30
Factores de la fermentación del café	32
Fermentaciones sólidas.....	32
Fermentaciones sumergidas.....	33
Métodos de degradación de mucílago durante la fermentación del café.....	33
Sistema abierto	34
Sistema cerrado.....	34
Reacciones bioquímicas durante el fermentado del café	34
Proceso de secado del café.....	34
Secado del café.....	34
Tipos de secado de los granos de café	34
Método de secado: café natural.....	34
Secado Húmedo: café lavado.....	35
Secado en carpa sobre loza	35
Secado en carpa solar.....	35
Secado manual.....	36
Cambios en los granos de café durante el proceso de secado	37
Proceso de tostado del café	37
Cambios fisicoquímicos durante el tostado.....	38
Cambios de pH en el tostado de café.....	38
Las reacciones químicas importantes durante el proceso de tostado.....	39
Colorimetría	42

Colorimetría en granos de café tostados.....	42
Control de tueste del café.....	43
Calidad del café.....	44
Calidad del café tostado.....	44
Efectos Observables	44
HIPÓTESIS	45
METODOLOGÍA.....	46
Diseño de la investigación.....	46
GRANOS DE CAFÉ.....	46
Muestra	46
Variables.....	47
instrumentos utilizados en la de medición.....	47
Descripción de las técnicas utilizadas	47
A) Color en granos de café tostado	47
B) Capacidad antioxidante de la mezcla de café	48
Preparación y extracción de compuestos.....	48
Determinación de compuestos polifenoles totales.....	49
Procedimiento para la determinación de la capacidad antioxidante.....	49
C) Características microestructurales y morfológicas de la mezcla de café <i>Arábica</i> y <i>Catimor</i> secado a 200, 215 y 225 °C.	50
Descripción del análisis estadístico	50
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
CONCLUSIÓN.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes principales del fruto del café (Gómez, 2019).	14
Figura 2. Mutaciones en variedades de café (Cortina et al., 2012).	17
Figura 3. Terpenos presentes en café (López, 2015).	19
Figura 4. Ácidos orgánicos presentes en café (López, 2015).	19
Figura 5. Ácidos fenólicos presentes en café (López, 2015).	21
Figura 6. Estructura química de la cafeína (López, 2015).	21
Figura 7. Conversión de trigonelia a Nicotinamida (López, 2015).	26
Figura 8. Conversión de Pirrol a Furfural-mercaptano (López, 2015).	26
Figura 9. Procesos fermentativos a partir de piruvato (Ayala, 2022).	30
Figura 10. Fermentación sólida del café (Cafeaconcagua, 2022).	32
Figura 11. Fermentación sumergida del café (Cafeaconcagua, 2022).	33
Figura 12. Secado del café en carpa sobre loza (Bedoya, 2022).	35
Figura 13. Secado en carpas (Devida, 2020).	36
Figura 14. Secador manual (Delgado, 2017).	36
Figura 15. Grados de tostado de café (Hernández, 2012).	40
Figura 16. Color en granos de café (Aquateknica, 2023).	43
Figura 17. Colorímetro (Aquateknica, 2023).	43
Figura 18. Ubicación geográfica de la zona de recolección del café (Google Maps, 2023). 46	
Figura 19. Escala CIE-Lab (XRITE, 2018).	48
Figura 20. Polifenoles totales en EA, EE y EM a 200, 215 y 225 °C.	52
Figura 21. Captura de radicales ABTS a 200, 215 y 225°C.	53
Figura 22. Captura de radical DPPH (%) a 200, 215 y 225°C.	54
Figura 23. Microfotografías del grano de café verde.	55
Figura 24. Microfotografías del grano de café tostado a 200°C.	56
Figura 25. Microfotografías del grano de café tostado a 215°C.	56
Figura 26. Microfotografías del grano de café tostado a 220°C.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación taxonómica de Coffea arabica.....	15
Tabla 2. Tipos de compuestos bioactivos.....	22
Tabla 3. Composición química de granos de café verde y tostado.....	41
Tabla 4. Diseño experimental en bloques al azar para la evaluación antioxidante..	50
Tabla 5. Resultados de color en la mezcla de café Arábica y Catimor en tres temperaturas de tostado.....	51

INTRODUCCIÓN

El café es uno de los principales productos agrícolas que se consumen a nivel mundial; en México, gracias a la geografía nacional, es posible cultivar y producir variedades clasificadas entre las mejores del mundo en 15 estados de la república, en una superficie de 737,376.45 hectáreas. A nivel internacional, México es el octavo productor mundial (Medina *et al.*, 2016).

Chiapas, es un estado con una gran tradición en el cultivo y la comercialización del café, la variedad de café que más se produce, igual que en el resto del país, es la denominada “*arábiga*”, también se cultiva el café “*robusta*” (Flores Vichi, 2015), sin embargo, existen una gran diversidad de granos producto de una serie de cambios y mutaciones tanto naturales como artificiales; estos cambios han diversificado y modificado la composición pura del café, difiriendo las especies y las variedades; por ello, es importante la investigación de las diferentes variedades del café y sus mezclas dentro del proceso de transformación, centrándonos en la parte del tostado y cómo este, cambia la composición de una mezcla de café ya que este proceso afecta al contenido de antioxidantes y por lo tanto, sus cualidades.

Al café se le atribuye capacidad diurética, activa el sistema digestivo, minimiza el riesgo de enfermedades cardíacas, diabetes, cáncer y activa el sistema nervioso y neuromuscular.

Por lo anterior, la presente investigación pretende contribuir en el desarrollo del conocimiento sobre el procesado de estas nuevas mezclas de café, y determinar el comportamiento de su capacidad antioxidante sometida a tres condiciones de temperatura.

JUSTIFICACIÓN

El café se considera un producto funcional gracias a su diversidad de biomoléculas; se ha demostrado que contiene una variedad de compuestos antioxidantes (Coello *et al.*, 2022).

Los ácidos clorogénicos, presentes en las diferentes partes del fruto de café, poseen actividad antioxidante, hipoglucemiante, antiviral, hepatoprotectora y nutracéutica (Chávez *et al.*, 2019), las cuales se ven afectados durante el tostado, ya que la temperatura disminuye los compuestos fenólicos presentes en el café, influyendo en la actividad antioxidante (Pacheco *et al.*, 2020).

Por lo tanto, dentro del proceso del tostado del café, la temperatura y el tiempo repercuten de manera directa en la disponibilidad de los compuestos fenólicos, consiguiendo diferentes efectos nutricionales.

Evaluar la capacidad antioxidante de diferentes mezclas de café tostado, permite comprender mejor cómo esta operación afecta su calidad. Dentro de este proyecto se evalúa la capacidad antioxidante de la mezcla de los cultivares de café *Arábica* y *Catimor* tostado a 200, 215 y 225 °C.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De las más de 100 especies del género *coffea*, solo 2 son de importancia económica estas especies están caracterizada según las cualidades que las diferencian de las demás, sin embargo, la caracterización durante su proceso de transformación para uso comercial, como fermentación, lavado secado y tostado, es igual de relevante que la caracterización total de las plantas y de sus frutos (Velásquez, 2019).

El valor nutricional del grano de café varía en función de la especie y el tratamiento, por ejemplo, durante el proceso de tostado, los aceites liberados como resultado de la descomposición de las lipoproteínas complementan su aroma, la cafeína a pesar de ser una molécula volátil, cambia su contenido (en peso) ligeramente durante el proceso de tostado, esto se debe a que el calor aplicado durante el proceso ayuda a liberar de unirse a otras moléculas, pero no es suficiente para vaporizarla, finalmente la trigonelina sufre un proceso de conversión a nicotinamida.

El aroma del café tostado se atribuye a los diversos grados de tueste (hasta más de 200 moléculas en estudios de cromatografía de gases), se encuentran presentes: "ácidos volátiles", alcoholes (metilacetilcarbinol), fenoles, aldehídos (furfural y sus derivados), cetonas (acetona, etc.), derivados nitrogenados (metilamina, pirrol, piridina), furfural mercaptano (López, 2015).

Los diferentes grados de tueste dan como resultado características diferentes según la temperatura aplicada, porque repercute en la fracción volátil, es importante determinar las propiedades físicas, estructurales y capacidad antioxidante en el tostado de la mezcla de café, es decir, analizar sus propiedades físicas y los cambios en la estructura general de sus partes y su efecto en su composición química, repercutiendo a su vez en su estado nutricional. Por lo tanto, el presente proyecto analiza la composición de los granos de café después del tostado para garantizar su seguridad y la calidad, además de permitir comprender mejor su valor nutricional y composición química.

OBJETIVOS

GENERAL

Determinar las propiedades físicas, estructurales y capacidad antioxidante en el tostado de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* a diferentes temperaturas (200, 215 y 225 °C).

ESPECÍFICOS

- a) Evaluar el color de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* tostado en tres temperaturas (200, 215, 225 °C).
- b) Determinar la capacidad antioxidante de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* secado en tres temperaturas (200, 215 y 225°C).
- c) Identificar las características microestructurales y morfológicas de la mezcla de las variedades *Arábica* y *Catimor*.

MARCO TEÓRICO

GENERALIDADES DEL CAFÉ

Producción de café en México

El café es uno de los principales productos agrícolas que se consumen a nivel mundial; en México, gracias a la geografía nacional, es posible cultivar y producir variedades clasificadas entre las mejores del mundo en 15 estados de la república, en una superficie de 737,376.45 ha a nivel internacional, México es el octavo productor mundial de café.

India y México ocuparon el quinto y sexto lugar respectivamente durante el periodo de producción 2000 a 2012. Chiapas, por su parte, es el principal productor de este aromático, con una superficie sembrada equivalente a 260,129.43 ha, con aproximadamente 180,856 productores cafetaleros y 402,099.78 t de producción en el año 2014 (Medina *et al.*, 2016).

El área de siembra a abril de 2022 fue de 700,994 hectáreas, 10,715 hectáreas (1.5 %) menos que durante el mismo período del año anterior (711,708 hectáreas); los estados con mayor participación, que representan el 74.4% del área total del país, son: Chiapas con un (34.8%), Veracruz (20.6%) y Oaxaca (19.0%). La superficie cosechada del fruto del café fue de 644,801 hectáreas, con un rendimiento de 969,184 toneladas (t), un aumento de 49,468 toneladas (5.4%) respecto al ciclo anterior (919,071 toneladas). Los resultados anteriores pueden explicarse por los mayores rendimientos, pasó de 1.44 toneladas por hectárea en abril de 2021 (ciclo 2021) a 1.50 toneladas por hectárea en el mismo mes de 2022 (ciclo 2022) y la superficie cosechada aumentó en 7,189 hectáreas (1.1%) más, en contraste con al periodo previo (Cortés, 2022).

Producción y variedades que se cosechan en el estado de Chiapas

Chiapas es un estado con una gran tradición en el cultivo y la comercialización del café. La variedad de café que más se produce en él (al igual que en el resto del país) es la denominada “arábica”, también se cultiva el café “robusta” que es la otra especie que se produce comercialmente en el mundo y se usa sobre todo en la industria de los cafés solubles (Flores Vichi, 2015). Chiapas, principal estado productor, reporta un volumen de producción de 371 mil 747 toneladas, con una aportación al total nacional de 38.4%, le siguen en importancia, Veracruz con 242 mil 750 (25.0%) y Puebla 171 mil 619 (17.7%), los tres estados contribuyen al país con 81.1%. Puebla y Veracruz presentan los mayores incrementos, con 27,812 ton

(19.3%) y 13,261 (5.8%), en relación con lo obtenido en el mismo periodo de 2021, respectivamente.

El fruto del café (Figura 1), consta de seis partes principales, el exocarpio o cáscara externa, el mesocarpio, constituido por el mucílago, que es una sola capa o cobertura que al despulpar el fruto, una parte se queda adherida al exocarpio y otra al endocarpio o pergamino, que es lo que debe eliminarse para obtener los cafés lavados, el endocarpio o pergamino, el espermodermo o película plateada, el endospermo o semilla de café, la cual normalmente tiene una cara convexa y otra plana con una fisura en el medio, embrión o germen, por cada fruto sano de café, se encuentran, generalmente, en su interior dos semillas con la cara plana una frente a la otra (Gómez, 2019).

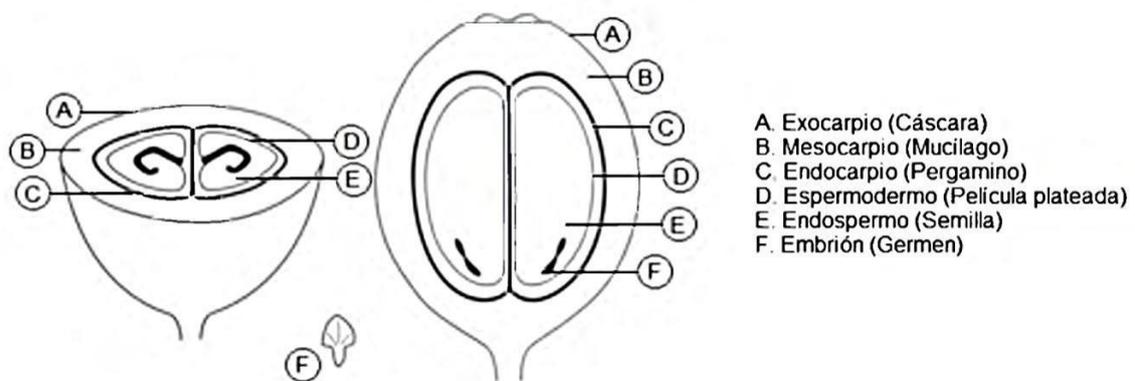


Figura 1. Partes principales del fruto del café (Gómez, 2019).

El café (*Coffea arabica* L.), es originario de las tierras altas de más de 1,000 msnm en Etiopía y Sudán (África) (Blanco *et al.*, 2003). *C. arabica* fue descrito por primera vez en 1753 por Linneo. Se trata de un arbusto grande, de unos 5 m de altura, con hojas ovaladas y de color verde oscuro brillante. La floración se produce después del periodo de lluvias, y sus flores son blancas, de aroma dulce y están dispuestas en racimo (Rojo, 2014).

Tabla 1. Clasificación taxonómica de Coffea arabica

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Subdivisión:	<i>Angiospermae</i>
Clase:	<i>Magnoliata</i>
Subclase:	<i>Asteridae</i>
Orden:	<i>Rubiales</i>
Familia:	<i>Rubiaceae</i>
Género:	<i>Coffea</i>
Especie:	<i>"Arabica, canephora, liberica", entre otras.</i>

Fuente: (Díaz, 2020).

Los frutos verdes y ovalados, se vuelven rojos cuando maduran, al cabo de 7-9 meses. Cada fruto contiene habitualmente dos semillas de aspecto chato y aplanado. *C. arábica* se cultiva en toda Latinoamérica, África Central y Oriental, India e Indonesia. Sus variedades más conocidas son: “*Arábica*” (*typica*) y ‘*Bourbon*’, a partir de éstas se han desarrollado nuevas cepas y cultivares diferentes, como “*Caturra*”, “*Mundo Novo*”, “*Tico*”, “*San Ramón*”, “*Moca*”, “*Maragogipe*”, “*Columnaris*” o “*Blue Mountain*” (Rojo, 2014), cada una con variedad genética diferente según la selección artificial y natural, la calidad del café depende de factores como el origen genético, las condiciones de cultivo (tipo de suelo, altitud y clima), los cuidados sanitarios, las prácticas agronómicas y cuidados de la cosecha (grado de madurez) y el manejo poscosecha, incluyendo tipo y control (Luna *et al.*, 2019).

ESPECIES DE CAFÉ

Coffea Arábica

Es la especie más cultivada en el mundo y aporta aproximadamente el 60 % de la producción mundial de café, produce bebida de buena calidad. Dentro de las especies del género *Coffea*, solamente la especie *Arábica* es autógama, es decir que la flores de estas tienen la capacidad de autopolinizarse, pero siempre podría suceder un máximo del 9 % de polinización cruzada o sea la intervención del polen de flores de otras plantas. La autopolinización se debe a que la especie *Arábica* es una planta tetraploide, compuesta de células que contienen el doble de cromosomas que una célula somática normal o sean 92 cromosomas. Esta cantidad se presenta en las células germinales antes de dividirse (Velásquez, 2019).

Coffea canephora

También llamada *Robusta*, aporta alrededor del 40% de la producción mundial de café. Produce una bebida de menor calidad que la del café *Arábico*. Al igual que las demás especies de café es una planta diploide, o sea que cada célula contiene dos series de cromosomas, con un total de 46 cromosomas; por lo que, cada flor necesita el polen de flores de otras plantas para su polinización (Velásquez, 2019).

VARIEDADES DE CAFÉ

Variedades descendientes del *C. arabica*

C. arabica es una especie que se autopoliniza, lo que conduce a que sus variedades tiendan a permanecer genéticamente estables. No obstante, se han cultivado cepas con mutaciones espontáneas debido a sus características deseables. “*Caturra*” por ejemplo, es una forma compacta de borbón, “*Maragogipe*” es un *typica* de granos grandes, “*San Ramón*” es un *typica* enano y “*Purpurascens*” un *typica* de hojas púrpura. También se han desarrollado cultivares adaptados a condiciones regionales específicas (clima, tipo de suelo, enfermedades, entre otros) con el objetivo de alcanzar un rendimiento económico máximo. Este es el caso de las variedades “*Blue Mountain*” (derivado del *typica* de Jamaica, es cultivado comercialmente en Kenia y es resistente a la enfermedad del grano del café), “*Mundo Novo*” (cruce de *typica* y *bourbon*, originalmente cultivado en Brasil), “*Ken*” (desarrollado en la India y de hojas color bronce, produce café de gran calidad y es resistente a varias enfermedades), *SL28* y *34* (desarrolladas en Kenia, también producen café de gran calidad, aunque son sensibles a la roya y a la enfermedad del grano del café) y “*Catuai*” (híbrido de *Mundo Novo* y *Caturra*, se cultiva en Sudamérica) (Rojo, 2014).

Bourbon

World Coffee Research (WCR) describe la variedad *Bourbon* como una planta alta, de rendimiento medio con hojas de color verde en las extremidades, que tiene el potencial de producir un café de buena calidad a gran altitud. Es una mutación natural de la planta *Arábica*, la cual ha crecido de forma silvestre en Etiopía durante muchos siglos. Debido al transporte y la migración, se cultivaron *Típica* y *Bourbon* por primera vez en Yemen. En el siglo XVIII, los holandeses llevaron *Típica* al sudeste de Asia, mientras que los franceses llevaron *Bourbon* a Île *Bourbon* (actual Isla Reunión), una isla cerca de la costa de Madagascar. En el siglo XIX, los misioneros franceses comenzaron a introducir *Bourbon* en toda África y las Américas (Castellano, 2020).

Caturra

La variedad *Caturra* es una mutación de la variedad *Bourbón*, descubierta en Brasil a principios del siglo veinte. En la década de los 40 se introdujo a la finca Chocolá, San Pablo Jocopilas, Suchitepéquez; pero, su adopción comercial se realizó varios años más tarde. Es una planta de porte bajo, altura promedio de 1.80 metros, con eje principal grueso y entrenudos cortos; el ángulo de las ramas jóvenes es de 45 grados con el tallo principal; su ramificación se caracteriza por tener entrenudos cortos, con ramas secundarias abundantes que le da a la planta una apariencia compacta (Velásquez, 2019).

Timor

El híbrido de *Timor* tuvo su origen en un cruzamiento espontáneo entre la variedad Típica de *C. arábica* y *Robusta* de *C. canephora*, fue identificada alrededor de 1917 en una plantación en la isla de *Timor* Oriental (Océano Índico). La fuente de resistencia genética a la roya proviene de la especie *C. canephora*. El objetivo fue desarrollar variedades de porte bajo, productivas y resistentes a la roya al concluir una selección en 5 o 6 generaciones (25 a 30 años). Dos cruzamientos fueron realizados en Portugal en el Centro Internacional de las Royas del Cafeto (CIFC) y un tercero en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), Colombia (Velásquez, 2019).

Catimor

La llamada variedad *Catimor* no existe como tal. El término *Catimor* es una denominación genérica que se le ha dado a todos los genotipos y a todas las poblaciones derivadas de cruzamientos entre *Caturra X*, híbrido de *Timor* (figura 2). Como resultado de estos cruces se han obtenido variedades tanto en Colombia como en otros países (Cortina *et al.*, 2012).

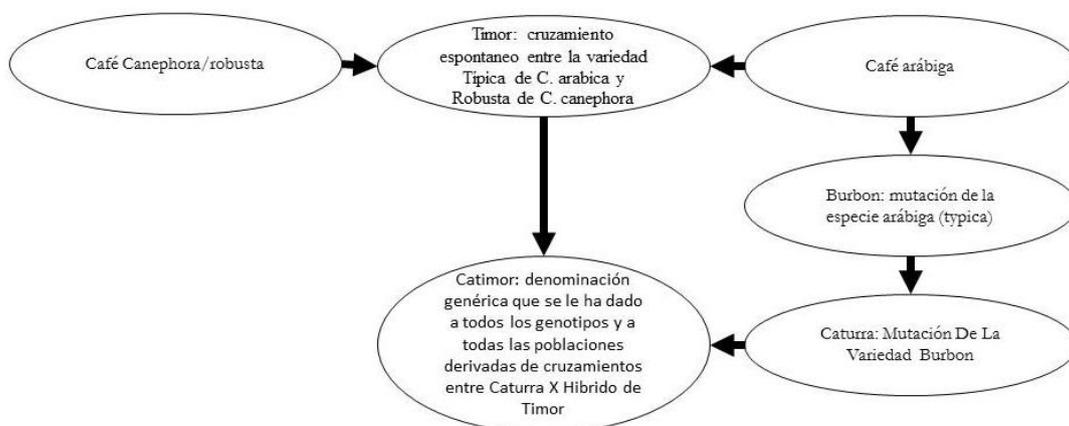


Figura 2. Mutaciones en variedades de café (Cortina *et al.*, 2012).

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS GRANOS DE CAFÉ

La cafeína, es el componente más conocido de los granos de café. En el *C. arabica* crudo, la cafeína se puede encontrar en valores que varían entre 0.8% y 1.4% (p/p), mientras que para la variedad *Robusta* estos valores varían entre 1.7% y 4% (p/p), sin embargo, el grano de café está constituido por varios otros componentes, que incluyen celulosa, minerales, azúcares, lípidos, taninos y polifenoles (Mussatto *et al.*, 2011). Contienen entre un 10% y un 13% de agua; y 3% a 4% de materias minerales, (López, 2015).

Dentro de los minerales, contiene potasio, magnesio, calcio, sodio, hierro, manganeso, rubidio, zinc, cobre, estroncio, cromo, vanadio, bario, níquel, cobalto, plomo, molibdeno, titanio y cadmio (Mussatto *et al.*, 2011). Los glúcidos («azúcares») representan más de la mitad en peso de las semillas desecadas. Los principales son galactomananos, xilanos, hemicelulosa y celulosa (López, 2015). Otros azúcares presentes son: la sacarosa, la glucosa, la fructosa, la arabinosa, la galactosa y la manosa (Mussatto *et al.*, 2011). En estos granos también se pueden encontrar varios aminoácidos como: alanina, arginina, asparagina, cisteína, ácido glutámico, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, treonina, tirosina y valina. Los granos de café contienen vitamina del complejo B, niacina (vitamina B3), y ácido clorogénico en proporciones que pueden variar del 7% al 12%, de tres a cinco veces más que la cafeína.

Entre las sustancias presentes en el café, sólo la cafeína es termoestable, es decir, no se destruye por un tostado excesivo. Otras sustancias como las proteínas, los azúcares, el ácido clorogénico, la trigonelina y la grasa pueden conservarse o incluso destruirse y transformarse en productos reactivos durante el proceso de tostado del café (Mussatto *et al.*, 2011).

Entre un 10% y un 15% de los granos secos son lípidos: glicéridos de los ácidos palmítico, esteárico, oleico y linoleico. La fracción lipídica no saponificable (~5%) está representada por esteroides y diterpenos: cafestol y kahwéol (figura 3). En el grano de café también se hallan pequeñas cantidades de ácido cítrico, málico y oxálico (figura 4), (López, 2015).

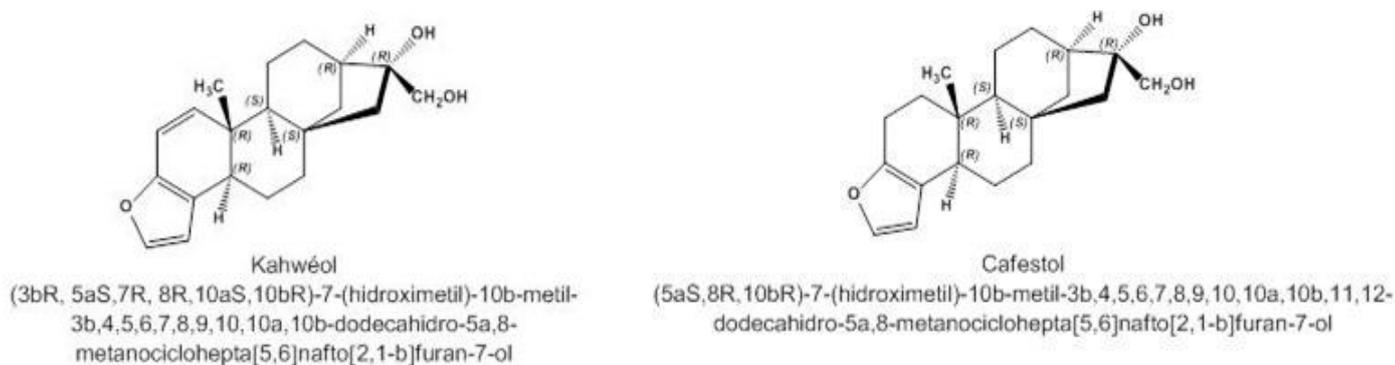


Figura 3. Terpenos presentes en café (López, 2015).

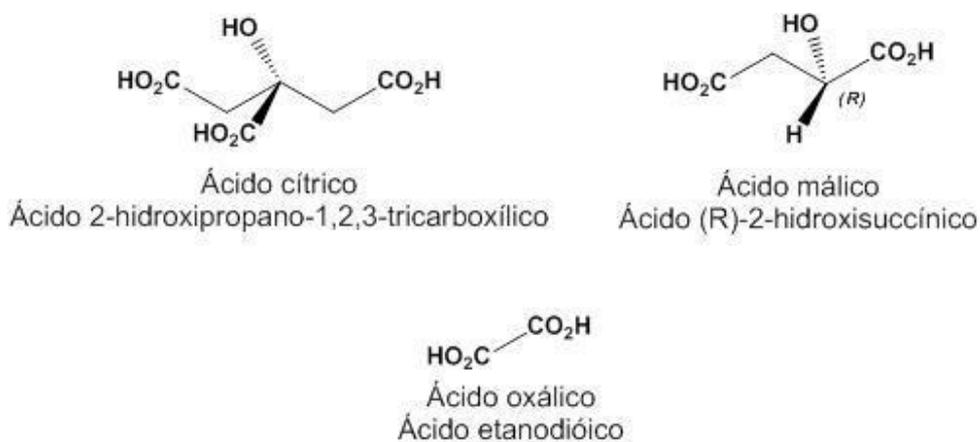


Figura 4. Ácidos orgánicos presentes en café (López, 2015).

Los granos de café tostados están compuestos de carbohidratos, fragmentos de proteínas, ácidos de bajo peso molecular, cafeína, trigonelina, lípidos, muchas moléculas desconocidas, generalmente llamadas melanoidinas, y más de 900 compuestos volátiles formados principalmente durante el proceso de tostado (Wei y Tanokura, 2015).

Ácidos fenólicos.

Los fenoles son compuestos ampliamente utilizado en productos a base de hierbas. Son una de las familias de metabolitos más importantes. Se producen como parte del metabolismo secundario en las plantas y son, principalmente un derivado de la fenilalanina y, en menor medida, también de la tirosina. Los tres grupos principales de compuestos fenólicos son: flavonoides, ácidos fenólicos y polifenoles. Químicamente, el fenol es una sustancia con un anillo aromáticos (incluidos sus derivados funcionales). Se ha demostrado que los ácidos

fenólicos inhiben el crecimiento bacteriano debido a las propiedades pro-oxidantes y su hidrofobicidad, que afecta la carga superficial de las células, lo que en última instancia conduce a la formación de grietas y escamas. El ácido cinámico, es un ácido monocarboxílico conjugado, es sólido a temperatura ambiente y fácilmente soluble en agua. Los ácidos y sus derivados ejercen controles importantes sobre el crecimiento bacteriano (Ayala, 2022). El más importante presente en los granos del café es el ácido clorogénico, descubierto originalmente por Rohleder en 1844, como "tanino de café". Es un éster de dos ácidos: ácido cafeico (ácido 3,4-dihidroxicinámico) y ácido quínico (ácido hexahidrotetrahidroxibenzoico). En el café el ácido clorogénico está combinado con la cafeína formando un complejo, clorogenato de potasio y cafeína (figuras 5 y 6), (López, 2015).

Polifenoles

Las sustancias fenólicas o polifenoles constituyen un grupo muy numeroso de sustancias que incluyen familias de compuestos con estructuras diversas, desde algunas relativamente simples, como los derivados de ácidos fenólicos, hasta moléculas poliméricas de relativamente elevada masa molecular, como los taninos hidrolizables y condensados. Los polifenoles pueden ser divididos en varios subgrupos atendiendo a su estructura básica. Los flavonoides, con estructura básica C6-C3-C6, incluyen a las antocianinas, los flavonoles y flavonas, las flavanonas, chalconas y dihidrochalconas, las isoflavonas y los flavan-3-oles. Otro subgrupo importante es el de los fenil propanoides, que incluye a los derivados de ácidos hidroxicinámicos (cafeico, ferúlico, sinápico, p-cumárico). También tienen importancia los estilbenoides (resveratrol) y los derivados del benzoico (ácido gálico y elágico, entre otros). Sólo de flavonoides se conocen más de 5,000 compuestos diferentes en la naturaleza. Muchos compuestos fenólicos son en parte responsables de las propiedades organolépticas de los alimentos de origen vegetal y por tanto tienen importancia en la calidad de los mismos (Barberán, 2003).

Compuestos nitrogenados.

Están conformados por bases *púricas*, principalmente la cafeína. Otras *bases púricas* (*xantina*, guanina, adenina y teobromina) están presentes en muy pequeñas cantidades. El compuesto nitrogenado, y principal constituyente del café, es la cafeína, fue aislada de los granos de café casi simultáneamente en 1820 en Alemania (*Runge*) y Francia (*Robiquet*) (López, 2015).

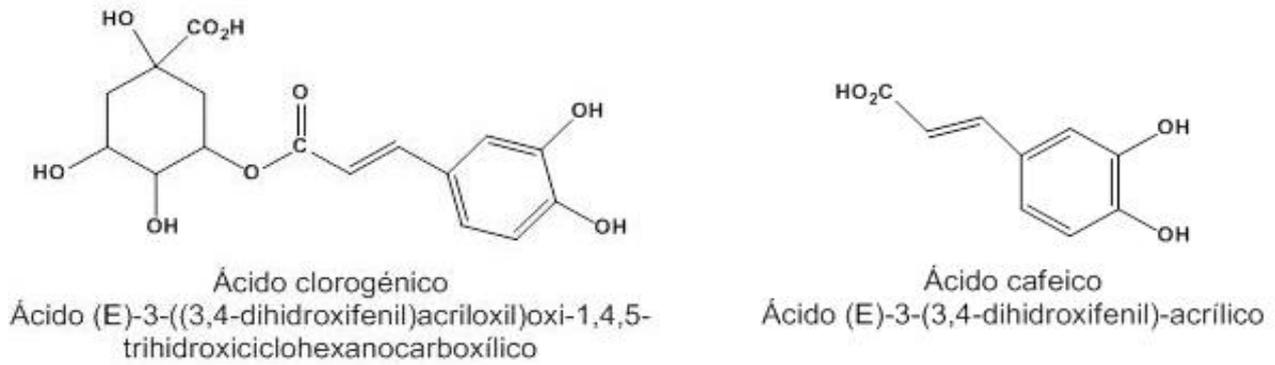


Figura 5. Ácidos fenólicos presentes en café (López, 2015).

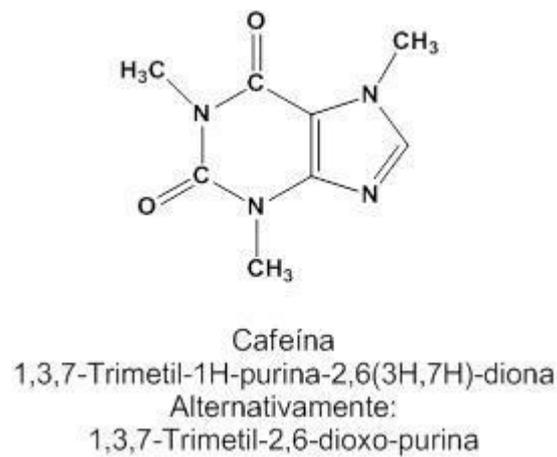


Figura 6. Estructura química de la cafeína (López, 2015).

Compuestos Bioactivos

Los compuestos bioactivos son sustancias químicas que se encuentran en pequeñas cantidades en las plantas y en ciertos alimentos y cumplen funciones en el cuerpo que promueven la salud; estos compuestos bioactivos son metabolitos secundarios producidos por plantas, que alteran positivamente los procesos metabólicos de diferentes maneras, lo que conduce a una mejor salud; estos efectos positivos, generalmente se asocian a la actividad antioxidante y antibacteriano de dichas moléculas.

Se ha encontrado evidencia de que ciertos compuestos bioactivos juegan un papel en el retraso del desarrollo de enfermedades como el cáncer y las enfermedades del corazón. Los vegetales poseen compuestos bioactivos que se encuentran en diferente concentración y son beneficiosos para la salud (Ayala, 2022). Provocan efectos farmacológicos y toxicológicos en el hombre y los animales. Los compuestos bioactivos son los fitoquímicos que se presentan

naturalmente en las plantas y en los alimentos, son una clase extremadamente heterogénea de compuestos que incluyen factores de crecimiento vegetal, alcaloides, micotoxinas, pigmentos de calidad alimentaria, antibióticos, flavonoides y ácidos fenólicos, etc., eficientes contra las especies oxidativas y posee la acción biológica potencial (Sadh *et al.*, 2018).

Tabla 2. Tipos de compuestos bioactivos

Compuestos bioactivos	Descripción
Fenoles	Compuestos químicos que tienen uno o más grupos hidroxilo unidos a un anillo aromático.
Flavonoides	Son los polifenoles más consumidos en la rutina alimentaria humana. Los flavonoides son una clase importante de nutrientes, que se encuentran ampliamente en productos orgánicos y vegetales.
Terpenoides	La estructura fundamental de los terpenos sigue un estándar general: estructuras de 2-metilbutano.
Carotenoides	Término convencional usado para designar el pigmento más comúnmente encontrado.
No carotenoides	El limoneno es un líquido incoloro rico en aceites esenciales de pino y cítricos y se utiliza como un odorante similar al limón en industrias y artículos domésticos.
Tioles	Los tioles se pueden caracterizar como compuestos de azufre.
Glucosinolatos	Son una clase de compuestos orgánicos que contienen nitrógeno, glucosa, aminoácidos y azufre en su estructura.
Ácidos fenólicos	Representan los compuestos fenólicos que tienen un grupo ácido carboxílico.
Polifenoles no flavonoides	Los taninos son polifenoles, en algunos casos llamados polifenoles vegetales, que muestran astringencia.
Fibras dietéticas (polisacáridos no amiláceos)	Los polisacáridos son biopolímeros muy extendidos, que representan el grupo de nutrientes más requerido en los piensos botánicos. Los carbohidratos constituyen una amplia categoría de nutrientes que van desde azúcares fácilmente digeribles por animales monogástricos presentes en el intestino delgado hasta fibra dietética fermentada por microbios presentes en el intestino grueso.

Fuente: (Menjo, 2021).

ANTIOXIDANTES

Los antioxidantes son agentes naturales presentes en los alimentos con efectos antimicrobianos, ya que pueden retardar o inhibir el crecimiento de agentes patógenos, por inhibición enzimática, inhibición de síntesis de ácidos nucleicos, inhibición del metabolismo energético, disminución de la unión celular, cambios en la permeabilidad de la membrana y alteración funcional de la membrana citoplasmática. Sin embargo, de algunos antioxidantes como los polifenoles, no se conoce el mecanismo de acción antimicrobiana (Lugo *et al.*, 2021). Dentro de las sustancias con actividad antioxidante se encuentran los compuestos fenólicos, antocianinas, ácidos fenólicos y carotenoides (Ayala, 2022).

Los antioxidantes evitan que se produzcan daños tisulares por radicales libres, actuando al reducir su formación o eliminarlos una vez originados. De esta forma, se pueden reducir las enfermedades asociadas al estrés oxidativo como la diabetes, la neurodegeneración, las enfermedades hepáticas, cardiovasculares y cáncer. En individuos adultos, las bebidas derivadas del café, constituyen el 64% de la ingesta total de antioxidantes. A pesar de que existen otros alimentos con una cantidad mayor de antioxidantes que el café, la frecuencia y volumen del consumo del mismo, lo convierten en la fuente dietaria principal de antioxidantes (Pérez *et al.*, 2013).

Actividad antioxidante

Existen diversos tipos de antioxidantes, según su mecanismo de acción. El utilizar unos u otros depende de la tecnología de la industria alimentaria. Normalmente se utilizan asociaciones de varios, buscando un sinergismo, es decir, una potenciación de los efectos antioxidantes. Otras veces, se utilizan antioxidantes que de por sí tienen la propiedad de potenciar a los demás, como ocurre con el ácido ascórbico. Normalmente trabajan descomponiendo los peróxidos, o impidiendo la formación de complejos con los restos de metales libres. Hay que tener en cuenta que los antioxidantes, no deben cambiar las características del alimento en cuanto a su sabor, color y olor. Es muy importante su estabilidad según el pH del alimento al que se adicionan, para que no sufran reacciones químicas que eviten su función. Deben ser inocuos para la salud, aunque el hecho de que sean autorizados no significa que sean inocuos, al igual que ocurre con los medicamentos. Por eso ocurre con frecuencia que después de ser autorizados durante años, se desautorizan. Los antioxidantes no funcionan indefinidamente. En el momento en que se saturan, ya no pueden captar más radicales libres y dejan de ser efectivos, pues el proceso de oxidación

continúa. Simplemente estabilizan los radicales libres en lo que hemos denominado periodo de latencia (Jamanca y Cruz, 2017).

Capacidad antioxidante

Los compuestos con actividad antioxidantes trabajan protegiendo al organismo de los radicales libres, los cuales causan el envejecimiento y el cáncer. Los radicales libres se encuentran en busca de un electrón para poder mantenerse estable electroquímicamente, debido a estos son moléculas bastante reactivas que quitan electrones a células sanas del organismo. El cuerpo humano no puede detener a los radicales libres por sus propios medios, por lo que busca obtener antioxidantes a partir de alimentos con altas propiedades para donar un electrón a los radicales libres. Los antioxidantes son moléculas que inhiben la oxidación de otras moléculas y son de interés para el desarrollo de alimentos y nutraceuticos. La capacidad antioxidante determina el poder general de un compuesto para eliminar los radicales libres que son los causantes de la oxidación (Ayala Jesús, 2022). La capacidad antioxidante evaluada *in vitro* puede usarse como un indicador indirecto de la actividad *in vivo*. La mayoría de los métodos para determinar capacidad antioxidante consisten en acelerar la oxidación en un sistema biológico. La capacidad antioxidante de un producto alimenticio está determinada por interacciones entre diferentes compuestos con diferentes mecanismos de acción. Por esto mismo, la determinación de la capacidad antioxidante de extractos complejos se lleva a cabo usualmente por diferentes métodos complementarios, que evalúan diversos mecanismos de acción (Mercado *et al.*, 2013).

COMPUESTOS BIOACTIVOS QUE SE GENERAN DURANTE EL TOSTADO DEL CAFÉ VERDE

Los diferentes grados de tueste dan como resultado un sabor único y los compuestos bioactivos de una taza de café. Los compuestos bioactivos como los fenólicos, los alcaloides, los productos de reacción de Maillard (MRP) y los terpenoides pueden proporcionar un efecto beneficioso para la salud. Tienen una alta actividad antioxidante que previene a nuestro organismo de enfermedades degenerativas como la diabetes mellitus tipo 2, el Parkinson, el Alzheimer y varios tipos de cáncer, sin embargo, algunos de los compuestos bioactivos (compuestos fenólicos totales (TPC) y los ácidos clorogénicos (CGA)), tienden a degradarse gradualmente durante los procesos de tostado, donde se ven afectados por el nivel de temperatura y la intensidad del proceso de tostado (Tarigan *et al.*, 2022).

El proceso de tostado, permite que el calor aplicado llegue al centro de la semilla sin carbonizar la cutícula; el contenido de agua varía desde 10% al 13% en el "café verde", hasta aproximadamente 5% en el café tostado, los minerales no cambian durante el proceso de horneado, la sacarosa sufre un proceso de inversión, los polisacáridos se hidrolizan parcialmente para producir oligosacáridos más solubles y volátiles, la composición de los lípidos prácticamente no cambia, pero durante el proceso de tostado, los aceites liberados como resultado de la descomposición de las lipoproteínas se extraen de los granos de café lo que complementa su aroma; por su parte, para la cafeína, a pesar de ser una molécula volátil, su contenido (en peso) cambia ligeramente durante el proceso de tostado, esto se debe a que el calor aplicado durante el proceso ayuda a liberar a la cafeína de unirse a otras moléculas, pero no es suficiente para vaporizarla, finalmente la trigonelina sufre un proceso de conversión a nicotinamida (figura 7).

Los procesos que describen al aroma del café tostado se atribuyen a los diversos grados de tueste (hasta más de 200 moléculas en estudios de cromatografía de gases). Existen moléculas de "ácidos volátiles", alcoholes (metilacetilcarbinol), fenoles, aldehídos (furfural y sus derivados), cetonas (acetona, etc.), derivados nitrogenados (metilamina, pirrol, piridina), furfural mercaptano, etc., (López, 2015).

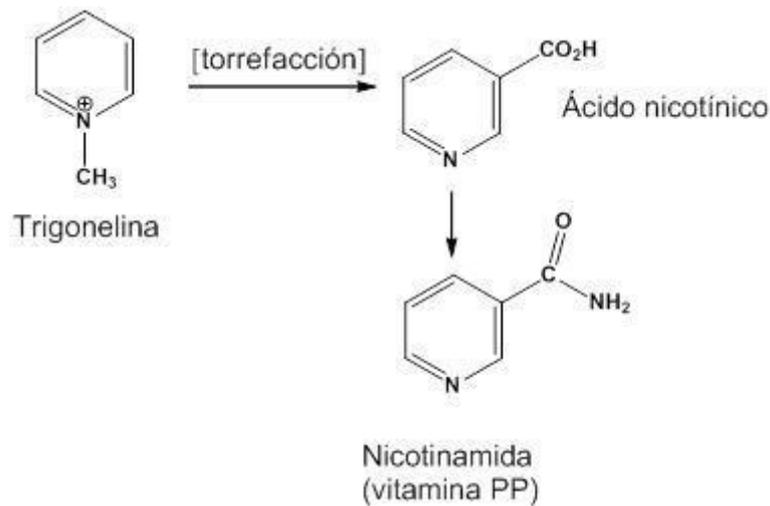


Figura 7. Conversión de trigonelia a Nicotinamida (López, 2015).

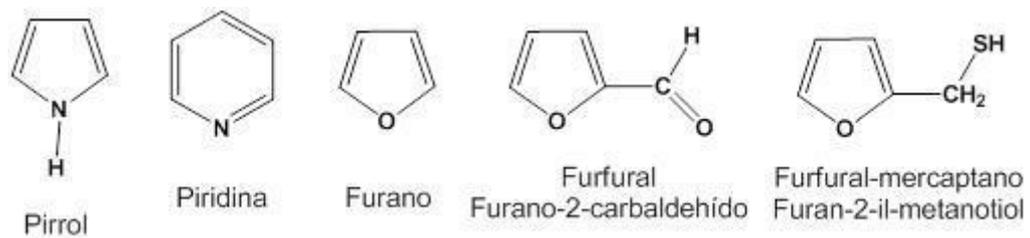


Figura 8. Conversión de Pirrol a Furfural-mercaptano (López, 2015).

Antioxidantes en el café tostado

Durante el procesamiento del café, el tostado afecta marcadamente su composición, lo que puede reducir la actividad antioxidante, debido a la degradación del ácido clorogénico y otros compuestos fenólicos. Sin embargo, la actividad antioxidante del café tostado se puede mantener debido a la formación de los productos de la reacción de Maillard. Durante la última etapa de la reacción de Maillard, se forman compuestos poliméricos de color café llamadas melanoidinas. Éstas influyen en el color, sabor y textura de los alimentos sometidos a temperaturas altas. Entre algunas actividades biológicas importantes de las melanoidinas se encuentran la actividad antioxidante y quelante (Pérez *et al.*, 2013).

CARACTERÍSTICAS DEL PROCESAMIENTO DEL CAFÉ.

Durante el proceso de tostado del café, el vapor de agua y el dióxido de carbono (CO₂) después de cierto periodo de tiempo a una temperatura de 180°C, generan una alta presión que cambia la forma de las células, el volumen se incrementa y las paredes celulares reducen su grosor. El vapor de agua tiende a escaparse rompiendo partes del grano, provocando finas grietas en la parte plana de este, este proceso es llamado primer crack, ya que posteriormente ocurre un “segundo crack” después de un tostado largo a una temperatura superior a 200°C. En este punto, el CO₂ saliente destruye la estructura celular del grano (Ramírez y Santillan, 2021).

En el proceso del tostado se lleva a cabo la degradación, formación y liberación de una gran cantidad de compuestos químicos que dependen de las reacciones que se realizan 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 tiene un impacto directo en la fracción volátil del grano de café, ya que, según Juárez (2019), en los tostados oscuros se presentan sabores característicos como: tostado, quemado/acre, cenizas/hollín, ácido y picante; mientras que en el tostado medio se identifican atributos aromáticos como cacao, nuez y dulce.

Según Pérez (2016), se determinó el color de los granos de café verde midiendo la reflectancia (Color Test II – Neuhaus Neotec) en una escala de 0-200, encontrando que el grado de luminosidad de los granos de café verde se sitúa entre 164-185, correlacionando negativamente con la calidad del café tostado (-0.96), es decir, conforme la calidad del café disminuye, los granos eran más oscuros, esta relación la atribuyeron a la presencia de granos defectuosos y a la formación de ortoquinonas, por la acción de la polifenol oxidasa en el 5-CQA que puede producir el oscurecimiento de los granos verdes.

En el estudio de Lazcano (2016), observaron el efecto del tostado sobre la actividad antioxidante en la que tiende a disminuir conforme aumenta el nivel de tostado. Los granos de café procedentes de Nayarit presentaron tendencia a disminuir en la actividad antioxidante, teniendo para un tostado ligero 0.18 mmoles de Trolox/g, para un tostado oscuro 0.15 mmoles de Trolox/g. Los granos de café procedentes de Puebla presentaron la misma tendencia. Los granos de Chiapas presentaron actividad antioxidante en el tostado ligero de 0.26 mmoles de Trolox/g, para un tostado oscuro de 0.17 mmoles de Trolox/g. Los granos de café procedentes de Oaxaca se observó la misma tendencia a disminuir la

actividad antioxidante conforme aumenta el nivel de tostado, pero destaca un ligero aumento en los granos con tostado oscuro llegando a 0.17 moles de Trolox/g. En general, al analizar los diferentes granos, observaron que conforme aumenta el nivel de tostado disminuye la actividad antioxidante.

Paucar (2010), indicó que la captación de radicales libres es el principal mecanismo de acción de los antioxidantes en los alimentos. Se han desarrollado muchos métodos en los que se mide la capacidad antioxidante a través de la captación de radicales libres sintéticos en solventes orgánicos polares, por ejemplo, metanol, a temperatura ambiente. Los radicales usados son del tipo 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) y 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico) (ABTS). Estos métodos pueden ser útiles para la búsqueda de nuevos antioxidantes.

Díaz (2020), evaluó el contenido de polifenoles en los granos de café con tostado claro reportó de 39.27 a 43.0 mg AG/g, tostado medio 34.06 a 38.43 mg AG/g y 29.2 a 36.89 mg AG/g para tostado oscuro. Así mismo, de los resultados obtenidos, la mezcla mayor a 80% de *Caturra* y *Catimor* es la que obtuvo mejor resultado.

MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

Pillihuaman (2019), describe 4 métodos para determinar la capacidad de antioxidantes en los alimentos.

Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid)

Sustancia de fórmula molecular $C_{14}H_{18}O_4$ con masa molecular de 250.29 g/mol. Es un análogo de la vitamina E, soluble en agua y se utiliza en aplicaciones biológicas y bioquímicas para reducir el estrés oxidativo o daño. La capacidad antioxidante de trolox (TEAC) es una medida de fuerza antioxidante basado en trolox, expresado en unidades llamado trolox equivalente (TE). Debido a las dificultades para medir componentes antioxidantes individuales de una mezcla compleja, trolox equivalencia se utiliza como referencia para la capacidad antioxidante de los alimentos, suplementos.

Método del DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracil)

Este ensayo es muy popular para el estudio de antioxidantes naturales debido a su simplicidad y alta sensibilidad. Se basa en la teoría de que todo donador de hidrógeno es un antioxidante. El DPPH· (uno de los pocos radicales de nitrógeno estables que son comerciales) acepta un hidrógeno del antioxidante para formar DPPH, de forma que el efecto antioxidante es

proporcional a la desaparición de DPPH. Existen varios métodos para su monitorización, pero el más común es mediante espectrofotometría UV, por su facilidad y precisión. Este radical presenta un máximo de absorción a 517 nm, volviéndose amarillo cuando se forma DPPH, de forma que el efecto antioxidante puede ser fácilmente evaluado siguiendo la pérdida de absorción UV a 517 nm. Los resultados se expresan como TEAC.

Método del ABTS (ácido 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolín)-6-sulfónico)

El radical ABTS * Se produce por la oxidación del ABTS. Esta oxidación puede generarse de forma enzimática, química (dióxido de manganeso, persulfato potásico, radical piróxilo) o electroquímica. El radical catiónico obtenido es un compuesto de color verde-azulado estable con una absorción máxima a 734 nm. El método consiste en monitorizar la reducción del radical ABTS * causada por la adición de una muestra que contiene antioxidantes. Esto se realiza determinando la decoloración del ABTS a 734 nm. La absorbancia se compara con la del Trolox (análogo sintético y soluble de la vitamina E) y se expresa como TEAC (capacidad antioxidante equivalente de Trolox). La ventaja de este ensayo es que puede realizarse tanto en muestras hidrosolubles como liposolubles, eligiendo el disolvente apropiado en cada caso y que proporciona rápidamente los resultados más reproducibles empleando un equipo de laboratorio relativamente común como es el espectrofotómetro, ampliamente utilizado. Además, como la longitud de onda a la que se realizan las medidas de absorbancia no es común en los alimentos, hace que este método sea particularmente interesante para el estudio de extractos vegetales ya que elimina la posibilidad de interferencias de color.

Método FRAP (Reducción del hierro férrico a ferroso)

Este método se basa en la reducción, por un antioxidante y en condiciones ácidas, del hierro férrico (Fe^{3+} , prooxidante) a hierro ferroso (Fe^{2+}). Esta reducción se puede cuantificar gracias a la acción del TPTZ (cloruro de 2,3,5- trifeniltetrazolio), compuesto químico capaz de quelar el hierro, de forma que el 21 complejo Fe^{3+} -TPTZ tiene una intensa coloración azul con un máximo de absorción a 595 nm y el complejo Fe^{2+} -TPTZ tiene coloración amarilla. Por tanto, el efecto antioxidante (capacidad de reducción) se evaluará monitorizando la formación de este complejo con un espectrofotómetro. Este ensayo proporciona resultados reproducibles de forma rápida y su única desventaja es que debe realizarse en una matriz acuosa, debiendo por tanto usar como antioxidante de referencia, uno que sea hidrosoluble, como el ácido ascórbico o el Trolox. Debido a la complejidad de los procesos de oxidación, como vemos, no existe un único método que refleje de forma completa el perfil antioxidante

de una muestra y, por tanto, es bueno trabajar con varios métodos para facilitar la comparación y la interpretación de los resultados. Un buen método de determinación de la capacidad antioxidante debe ser sencillo, con un mecanismo químico y un punto final fijo, con un elevado rendimiento de análisis, con buena reproducibilidad intra e interlaboratorio, adaptable a ensayos con antioxidantes tanto hidrofílicos como lipofílicos y con diferentes fuentes generadoras de radicales libres.

FERMENTACIÓN

La fermentación es un proceso bioquímico mediante el cual se obtienen compuestos más simples generados como metabolitos secundarios por levaduras y bacterias (Figura 9). Se define la fermentación como los cambios bioquímicos que tienen lugar en sustancias orgánicas como consecuencia de la actividad de enzimas microbianas (Belda, 2022). La fermentación como ruta de transformación es una de las tecnologías alimentarias más antiguas y más utilizadas debido a sus capacidades para conservar y modificar sustratos y producir nuevos compuestos, (Vicenssuto *et al.*, 2020).

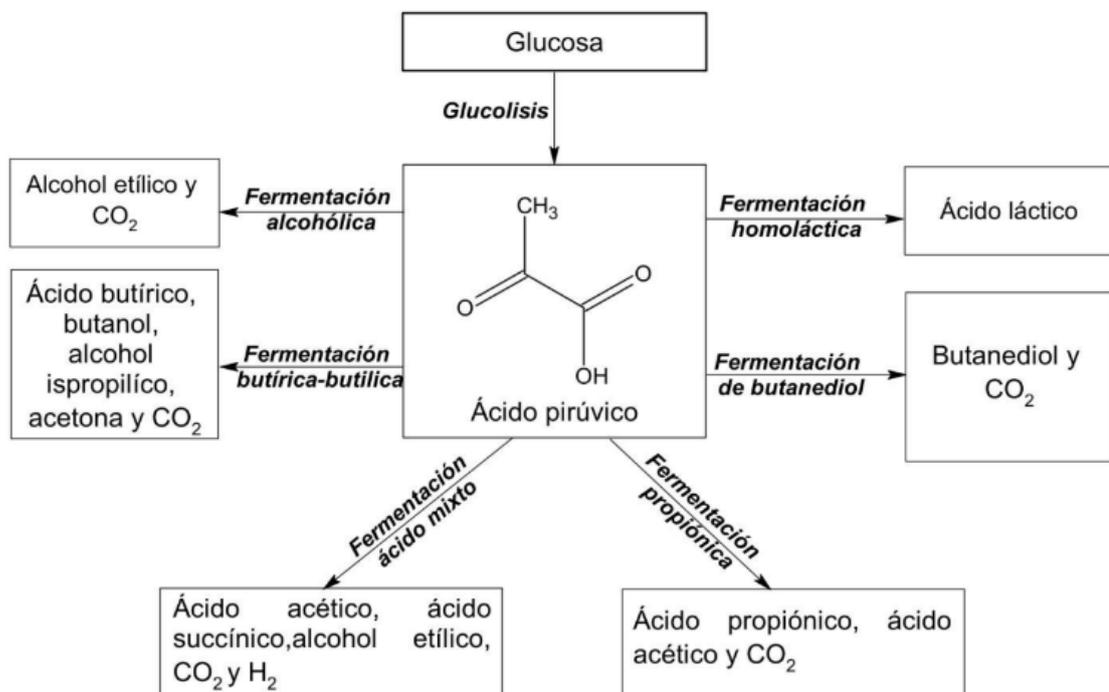


Figura 9. Procesos fermentativos a partir de piruvato (Ayala, 2022).

La fermentación es un proceso simple, y puede definirse como un proceso metabólico generador de energía en el cual tanto los dadores como los aceptores de electrones son compuestos orgánicos. En la fermentación, el sustrato da lugar a una mezcla de productos finales, unos más oxidados que él y otros más reducidos. Los sustratos fermentables no pueden ser ni muy oxidados ni muy reducidos. Los carbohidratos son por esta razón muy buenos sustratos para los procesos fermentativos, aun cuando las bacterias pueden también fermentar ácidos orgánicos, aminoácidos, piridinas y pirimidinas. La principal o única contribución de la fermentación es la producción de ATP, por fosforilaciones a nivel de sustrato. La fermentación tiene cuatro funciones principales, que contribuyen en el proceso de alimentación de las sociedades: Enriquecimiento de la dieta humana a través del desarrollo de una gran diversidad de sabores, aromas y texturas en los alimentos, así como de los conocimientos relacionados con la fermentación. Trayendo consigo mejoramiento nutricional de los sustratos de la alimentación, incrementando vitaminas, digestibilidad de proteínas, disponibilidad de aminoácidos esenciales y ácidos grasos, así como reducción de antinutrientes (en cereales) y aumento de la digestibilidad de la materia prima base (función de los lácteos fermentados) (Ferrari, 2020). En su mayoría, se utilizan tres tipos de procesos de fermentación, como la fermentación en estado sólido, sumergida y líquida. Las selecciones del proceso de fermentación son específicas del producto. Los procesos de fermentación sumergida y en estado sólido se utilizan para obtener compuestos bioactivos de interés industrial a partir de diversos sustratos, como los desechos. Ambos procesos se han utilizado tanto para la investigación como a nivel industrial, pero algunos procesos produjeron mejores rendimientos que otros porque el metabolismo llevado a cabo por los microorganismos es diferente en ambos procesos (Sadh *et al.*, 2018).

La fermentación es una parte clave en el procesamiento del café después de la cosecha. Para eliminar el resto de mucílago que queda junto al pergamino. Se debe colocar en fermentadores abiertos para dejarla en reposo por periodo de 15 a 40 horas según la temperatura del lugar, no se debe sobrepasar el tiempo de fermentación para evitar que se generen defectos como el grano manchado, decolorado y vinagre; así como los sabores agrio y rancio en la bebida. En la tecnología de la fermentación del café se requiere realizar controles de la temperatura, la calidad del agua, la calidad y sanidad del café y el tiempo del proceso de fermentación. Igualmente, para conservar los sabores especiales obtenidos con la fermentación controlada del café, es necesario realizar buenas prácticas de lavado, secado, almacenamiento y tostación (Sánchez, 2018).

Factores de la fermentación del café

La velocidad y la clase de productos generados en la fermentación del café dependen de factores que afectan el metabolismo mismo de los microorganismos, como la temperatura externa, el tipo de sistema de fermentación, el tiempo de proceso, la calidad del café en baba, la acidez del sustrato, la disponibilidad de oxígeno, la higiene (Puerta y Echeverry, 2015) y el secado el cual reduce el contenido de humedad del mismo, lo cual a su vez permite una fermentación controlada gracias al agua o al aire para ablandar la pulpa con el fin de extraer fácilmente los granos de la cereza (el fruto del café). Este proceso puede durar de varios días a varias semanas, dependiendo del clima y del método utilizado.

Sánchez de la Cruz (2019), menciona que en la fermentación del café se reconocen dos tipos: la fermentación sólida y la sumergida.

Fermentaciones sólidas

El café despulpado se deposita en el fermentador, no se adiciona agua. El desagüe del fermentador se mantiene cerrado (Figura 10).



Figura 10. Fermentación sólida del café (Cafeaconcagua, 2022).

Fermentaciones sumergidas.

El café en baba se deposita en el fermentador y luego se agrega agua, en cierta cantidad, con relación a la masa de café a fermentar, de esta forma cambian la composición química y microbiológica del sustrato. Los sistemas de fermentación sumergidos son más homogéneos que los de sustrato sólido. Para el café se recomiendan fermentaciones sumergidas al 30%. Se tapona el desagüe del fermentador y se adicionan 30 L de agua limpia por cada 100 kg de café baba (Figura 11).



Figura 11. Fermentación sumergida del café (Cafeaconcagua, 2022).

MÉTODOS DE DEGRADACIÓN DE MUCÍLAGO DURANTE LA FERMENTACIÓN DEL CAFÉ

Los métodos de degradación del mucílago durante la fermentación de café se realizan a través de dos sistemas, sistema abierto y cerrado (Puerta y Echeverry, 2015).

Sistema abierto

En las fermentaciones en el sistema abierto ocurren natural y simultáneamente las fermentaciones lácticas por *Lactobacillus spp.* y *Streptococcus spp.*, y la fermentación alcohólica por las levaduras, principalmente *Saccharomyces cerevisiae*.

Sistema cerrado

En los sistemas cerrados, los fermentadores se tapan, lo cual favorece también el desarrollo de fermentaciones mixtas, por las *Enterobacteriaceae*.

REACCIONES BIOQUÍMICAS DURANTE EL FERMENTADO DEL CAFÉ

Durante la fermentación natural del café ocurren diferentes procesos bioquímicos, en los que las enzimas producidas por las levaduras y bacterias presentes en el mismo mucílago fermentan y degradan sus azúcares, lípidos, proteínas y ácidos, y los convierten en alcoholes, ácidos, ésteres y cetonas. Estas sustancias formadas cambian las características de olor, color, pH y composición del sustrato (el mucílago) y también de los granos de café (Sánchez, 2018).

PROCESO DE SECADO DEL CAFÉ.

Secado del café

El mecanismo de secado del café es más complicado que el de cualquier otro grano, para que sea eficiente se deben conocer y controlar todas aquellas variables que influyen en el proceso con el fin de mantener la calidad del producto. La temperatura del aire durante el secado del café es una de las variables críticas a controlar (Henao, 2015).

Tipos de secado de los granos de café

El secado del café es un proceso de fermentación controlado que utiliza agua o aire para ablandar la pulpa y poder extraer fácilmente los granos de cereza.

Método de secado: café natural

Este método tradicional de secar el café también se llama "café normal" o "café natural" porque las cerezas se mantienen enteras y entre 10 y 30 días las cerezas forman una capa sobre el piso de concreto, idealmente del grosor de dos cerezas., o mejor aún, sobre una plataforma elevada conocida como la "cama africana". Las cerezas se deben voltear regularmente para que puedan fermentar uniformemente en el aire. Por la noche, se tapan las cerezas para que no absorban la humedad del aire nocturno. El contenido de humedad

de las cerezas frescas aumenta del 70% al 15-30% durante el secado y continúa hasta el 10-12%. El resultado de este proceso son granos de café con un rico aroma afrutado.

Secado Húmedo: café lavado

Los granos se resguardan de 6 a 72 horas. El tiempo medio de fermentación es de entre 12 y 36 horas. Las cerezas de café se trituran hasta obtener pulpa, los granos de café se remojan en agua y el mucílago se elimina durante el proceso de fermentación. El resultado del proceso es un café más limpio y natural, pero con menos cuerpo y una acidez más pronunciada (Naranjo, 2023).

Delgado (2017), mencionan tres tipos de secado empleados en el café:

Secado en carpa sobre loza

Se utiliza un área extensa para secar todas las muestras correspondientes por radiación solar. El proceso de secado en carpa sobre loza se realiza con un excelente cuidado, evitando pisar el café durante el secado, o que se moje por las lluvias repentinas. El café se mantiene en secado durante cuatro 4 días.



Figura 12. Secado del café en carpa sobre loza (Bedoya, 2022).

Secado en carpa solar

Se acondiciona un área establecida con un secador solar, tipo domo, de elaboración propia tomando como referencia secadores artesanales para secar las muestras (Figura 13). Las muestras se instalan para ser secadas por cuatro 4 días consecutivos hasta que se obtiene una humedad promedio de 13%.



Figura 13. Secado en carpas (Devida, 2020).

Secado manual.

Se confecciona un secador manual de capacidad 4 Kg con funcionamiento de energía natural (carbón) rotativo; además se improvisan agujeros alrededor del cilindro con la finalidad de que por estos ingrese aire y se caliente al ingresar al interior del cilindro así las muestras no se deshidraten rápidamente, para poder secar las muestras correspondientes. Este secador fue elaborado con la finalidad de secar las muestras correspondientes. En este secador, el tiempo óptimo y la temperatura al interior de este, son de 120 - 130 minutos y de 70 - 75 °C respectivamente, y con movimientos constantes con la finalidad de evitar que las muestras de pergamino se manchen y se deshidraten rápidamente ya que temperaturas superiores ocasionan daños a la calidad debido a que el grano no se seca uniformemente (figura 14).

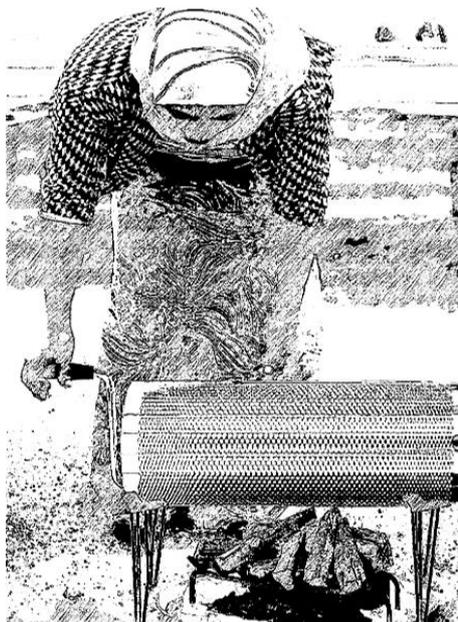


Figura 14. Secador manual (Delgado, 2017).

CAMBIOS EN LOS GRANOS DE CAFÉ DURANTE EL PROCESO DE SECADO

El secado del café, es quizá la operación más delicada del proceso de beneficio. Durante el secado se rebaja la humedad del café del 55% (humedad natural del café) al 12 – 13%. El secado del café convierte al café lavado en un producto estable, almacenable y duradero, y sobre todo un café con las características para poder ser analizado posteriormente mediante el proceso de catación (Delgado, 2017). En diferentes investigaciones se ha determinado el daño que causa en la estructura celular del café el uso de temperaturas excesivas durante el secado. Se recomienda para secado combinado (solar y mecánico) periodos de pre-secado solar de por lo menos tres días, flujos de aire bajos en el secado mecánico ($20-30 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$) y temperaturas de secado de 40°C , ya que estas condiciones contribuyen a la reducción de los valores de conductividad eléctrica y lixiviación de potasio, indicadores consistentes de la integridad de la membrana celular. Las altas temperaturas en el secado están relacionadas con la degradación de la membrana celular y como consecuencia puede haber fugas de lípidos que se oxidan afectando la estructura de los granos de café y la calidad sensorial del producto. A su vez, el uso de temperaturas de secado demasiado bajas genera periodos de secado largos que alteran la calidad del café, ya que cuando el contenido de humedad es alto se desarrollan microorganismos que producen compuestos no deseados como el ácido butírico y propiónico (Henaó, 2015).

Proceso de tostado del café

El tostado de los granos de café es otro paso muy importante en el procesamiento del café, ya que se desarrollan propiedades organolépticas específicas (sabores, aromas y color) que afectan la calidad del café y la excelencia de la bebida de café, como consecuencia. Este proceso depende del tiempo y la temperatura y conduce a varios cambios en la composición química, física y las actividades biológicas del café como resultado de la transformación de los constituyentes polifenólicos naturales en una mezcla compleja de productos de reacción de Maillard, así como la formación de compuestos orgánicos resultantes de la pirólisis. Los compuestos de azufre también se modifican por oxidación, degradación térmica y/o hidrólisis, y el contenido de vainillina aumenta considerablemente durante el proceso de tostado. Además de las reacciones químicas durante el tostado del café, se producen pérdidas de humedad y otros cambios importantes (color, volumen, masa, forma, pH, densidad y componentes volátiles), mientras que el CO_2 se genera. Por lo tanto, el tostado del café es un proceso bastante complejo considerando la importancia del calor transferido al grano. Después del proceso de tostado, los granos de café deben enfriarse rápidamente para detener

las reacciones exotérmicas y evitar un tostado excesivo, que podría poner en peligro la calidad del producto (Mussatto *et al.*, 2011).

Numerosos estudios se han centrado en el tueste (por ejemplo, el grado de tueste y los perfiles de temperatura y tiempo de tueste) debido al impacto significativo del tueste en la formación de varios cientos de compuestos químicos asociados con el sabor del café que están directamente relacionados con la calidad del café. Se produce una reacción compleja durante el tostado, es decir, las reacciones de Maillard, la descomposición del azúcar, la oxidación de lípidos y la pirólisis. La interacción entre la liberación de aminoácidos y azúcares reductores, llamada reacción de Maillard, indujo la formación de precursores del aroma. La etapa de caramelización crea el color del café, mientras que las reacciones de pirólisis producen compuestos volátiles y no volátiles y contribuyen al aroma y sabor característicos de una taza de café. La temperatura, el tostado y el tiempo son factores críticos para proporcionar un perfil sensorial decente de una taza de café (Tarigan *et al.*, 2022).

Cambios fisicoquímicos durante el tostado

Durante el proceso de tostado de los granos verde de café, esta provoca cambios físicos, como el contenido de agua, la forma, la densidad, la estructura y el color. La acumulación de dióxido de carbono (CO₂) de la reacción de Maillard en el interior de los granos produce agujeros en el primer chasquido o primeros sonidos de estallido. En la segunda audiencia popular, se observa el aceitoso por encima de la superficie inclinada, la grieta más larga y en el medio del grano la estructura celular comienza a romperse. El contenido de humedad y la intensidad de la luminosidad disminuye junto con el aumento del grado de tostado. Además de lo físico, el proceso de tostado afecta los cambios químicos, ya que se lleva a cabo la reacción química compleja, es decir, la caramelización, la reacción de Maillard y la pirólisis producen un sabor agradable (Tarigan *et al.*, 2022).

Cambios de pH en el tostado de café

El café elaborado con granos verdes tiene un rango de pH de 5.41 a 5.91, que es más alto que el del café tostado (4.95 a 5.39), pero los diferentes grados de café elaborado tienen diferentes expresiones de pH, es decir, un tueste más claro tiene un pH más bajo que un café tostado. Frito oscuro. El pH o la acidez del café tostado puede deberse a la formación de ácidos grasos durante el proceso de tostado. El café tostado contiene macrocomponentes como carbohidratos, proteínas, grasas y minerales, además de compuestos bioactivos como trigonelina, cafeína, tocoferoles y diterpenos. El contenido de CGA en el café tostado es de aproximadamente 1.30-3.54 g/100 g. Los alcaloides como la trigonelina también se reducen,

pero la cafeína permanece estable durante el proceso de tostado. La trigonelina y la cafeína en el café tostado son aproximadamente 0.72-1.03 g/100 g y 0.88-1.53 g/100 g, respectivamente. El contenido de ácido clorogénico, trigonelina. Estos tres compuestos bioactivos, ácido clorogénico (CGA), cafeína y trigonelina, afectan la calidad del café elaborado (Tarigan *et al.*, 2022).

Las reacciones químicas importantes durante el proceso de tostado.

Algunos factores afectan el proceso de tostado del café, como la variedad de café, la temperatura, el tiempo, el flujo de aire y el método de tostado. A partir de cambios fisicoquímicos, el proceso de tostado del café puede verse afectado por la actividad del agua (A_w) que está asociada con la reacción de Millard (condición de baja A_w). El proceso de tostado consta de dos etapas; la etapa de secado y la etapa de tostado. Estas etapas se pueden distinguir por la temperatura en la que la etapa de secado se realiza por debajo de los 160°C mientras que la etapa de tostado utiliza la temperatura entre 160 y 260°C. Varios mecanismos podrían alterar el grano durante el proceso de tostado, como la intensa absorción de calor que la estructura comenzará a cambiar a los 50°C, la desnaturalización de las proteínas y la evaporación del agua. El proceso de deshidratación provoca reducciones en el contenido de humedad del café (del 10 al 12 % de los granos verdes al 2.5 % de los granos tostados). En correlación con el contenido de agua de los granos, (A_w) es más descriptivo del grado de tostado del café. La A_w del café disminuye significativamente desde el tostado temprano (primero amarillo, marrón y primer crack) hasta el tostado ligero; sin embargo, su valor no difiere significativamente en la etapa de tostado posterior. Una cantidad particular de agua describe el vapor de agua con respecto a dar una alta presión y exagerar el volumen del grano. En el café de tueste bajo, indica que la reacción de Maillard está en progreso. Después de que se completa la etapa endotérmica, el proceso continúa con la reacción de descomposición térmica y pirólisis que puede convertir el café en un color marrón. Comienza a 190°C en la que se produce una importante reacción pirolítica que crea un agradable aroma y sabor a café. Algunas reacciones como la oxidación de lípidos, la reacción de Maillard y la caramelización ocurren simultáneamente durante el proceso. La alta intensidad de calor de la máquina tostadora oxidará el doble enlace de los ácidos grasos, por lo que se reducirá el yodo del aceite de café (Tarigan *et al.*, 2022).

No.	grado de tueste	°F	°C
1	grano verde	75	23,89
2	empieza a palidecer	270	132,22
3	comienzo de la etapa amarilla	327	163,89
4	amarillo-naranja	345	173,89
5	café ligero (light Brown)	370	187,78
6	café	393	200,56
7	comienzo del primer crack	401	205,00
8	termina el primer crack	415	212,78
9	tueste de ciudad (medio)	426	218,89
10	tueste de ciudad más (city +)	435	223,89
11	tueste completo de ciudad (full city)	446	230,00
12	medio oscuro (full city-)	454	234,44
13	vienna (french light)	465	240,56
14	completo frances (full french)	474	245,56
15	Totalmente carbonizado (fully carbonized)	486	252,22
16	quemado (immanent fire)	497	258,33



Figura 15. Grados de tostado de café (Hernández, 2012).

El sabor, el color y la textura de un café pueden verse afectados por la reacción de Maillard por la reacción entre la liberación de aminoácidos y azúcares reductores. Estos compuestos, con el uso de Amadori reordenamiento, produce bajo peso molecular de compuestos volátiles y no volátiles. Luego, la degradación de Strecker se produce por la interacción entre los aminoácidos y el compuesto de dicarbonilo que, a partir de entonces, formula compuestos de dicarbonilo reactivos como el pirualdehído y el diacetilo. Estos compuestos reactivos reaccionan con otros compuestos (amoníaco y sulfuro de hidrógeno) para desarrollar compuestos de sabor como pirazina, piridina, pirrol y furano. En el proceso de coloración, la cetosamina, uno de los productos de transposición de Amadori, se polimeriza para producir melanoidina, que contribuye al color marrón amarillento del café. Durante el proceso de tostado, las reacciones de Maillard y pirólisis generan gases que son

predominantemente dióxido de carbono (CO₂). Algunas partes del gas se liberan durante el proceso, mientras que la mayor parte del gas permanece atrapado dentro del café y se absorberá lentamente. La liberación de gas durante el proceso de tostado aumenta la presión de los granos en más de 10 bares y expande gradualmente el volumen de los granos. Finalmente, los granos de café tostados se enfrían inmediatamente para evitar un tueste exagerado que pudiera alterar el sabor (Tarigan *et al.*, 2022).

Tabla 3. Composición química de granos de café verde y tostado.

Componentes	<i>Arábica</i>		<i>Robusta</i>	
	Granos de café verde	Granos de café tostado	Granos de café verde	Granos de café tostado
Polisacáridos (%)	50.0-55.0	24.0-39.0	37.0-47.0	-
Oligosacáridos (%)	6.0-8.0	0-3.5	5.0-7.0	0-3.5
Lípidos (%)	12.0-18.0	14.5-20.0	9.0-13.0	11.0-16.0
Aminoácidos libres (%)	2.0	0	2.0	0
Proteínas (%)	11.0-13.0	13.0-15.0	11.0-13.0	13.0-15.0
Ácidos clorogénicos (%)	5.5-8.0	1.2-2.3	7.0-10.0	3.9-4.6
Cafeína (%)	0.9-1.2	0.1.0	1.6-2.4	0-2.0
Trigonelina (%)	1.0-1.2	0.5-1.0	0.6-0.8	0.3-0.6
Ácidos grasos (%)	1.5-2.0	1.0-1.5	1.5-2.0	1.0-1.5
Minerales (%)	3.0-4.2	3.5-4.5	4.0-4.5	4.6-5.6
Melanoidinas (%)	-	16.0-17.0	-	16.0-17.0

Fuente: (Wei y Tanokura, 2015).

COLORIMETRÍA

La colorimetría es la ciencia que cuantifica y describe físicamente los colores percibidos por el ser humano, así partiendo de la expresión de valores triestímulos como señales generadas en la retina, la colorimetría proporciona matemáticamente la fisiología de la visión humana, la cual puede combinarse con el análisis sensorial. En la calidad de los alimentos, la apariencia es el atributo visual más importante porque está relacionado con el tamaño, la forma y el color. El color es uno de los factores que más determina la apariencia de un producto alimenticio (Enríquez *et al.*, 2020). Por otro lado, las propiedades químicas de los pigmentos naturales responsables del color están directamente relacionadas con las propiedades de color final del producto alimenticio y diversos factores que afectan el equilibrio químico. La aplicación de la colorimetría triestímulo en imágenes digitales es posible con la participación del procesamiento de datos y color. Entre ellos, la información de color se extrae de cada píxel. Además de la distribución de todos los píxeles que componen la muestra, también es posible medir otros parámetros importantes: en cuanto a la apariencia, nada es imposible. (Heredia *et al.*, 2016)

Colorimetría en granos de café tostados

El color es una característica cambiante estrechamente asociada al proceso de tostado del café; durante el tostado del café verde este se vuelve marrón, y mientras más tiempo sea tostado más oscuro se tornará, por lo tanto, en la etapa del tostado se ha enfocado la atención en el resultado final del color deseado (Nayive *et al.*, 2012). Para determinar si los granos de café son de buena calidad, es importante medir el grado de tostado., se pasa por un proceso muy complicado, desde recoger los granos del árbol hasta llegar a la mesa. El café como producto cambia cada año, por lo que determinar la calidad del café consciente puede ser un proceso complejo. Lo más difícil es cosechar y preparar bien los granos de café, lo que afecta la calidad y consistencia final del café. El tipo de tostada puede ser clara, media u oscura (Aquateknica, 2023).

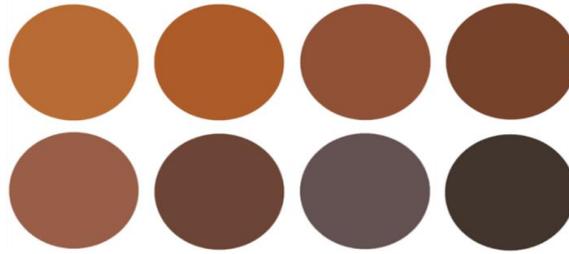


Figura 16. Color en granos de café (Aquateknica, 2023).

Control de tueste del café

Para realizar mediciones precisas y claras de color y nivel de tueste se requiere el colorímetro electrónico Tristimulus CR-410, especialmente diseñado para café, ampliamente reconocido a nivel mundial como referencia en diversas industrias. Utilizando el colorímetro Konica Minolta Sensing CR-410, se puede determinar que hay más granos de café en altitudes más altas. Color azul o verde azulado en comparación con los granos de café de regiones más bajas. Esto ayuda a identificar granos de mejor calidad (Aquateknica, 2023).



Figura 17. Colorímetro (Aquateknica, 2023).

CALIDAD DEL CAFÉ

Los principales factores que afectan la calidad del café en un sentido amplio son: La composición química de los granos, determinada por factores genéticos, ambientales y culturales y, principalmente, por la interacción entre ellos; métodos de cosecha, procesamiento y almacenamiento, finalmente el tostado y preparación de bebidas. Definir la calidad del café no es fácil, especialmente debido al hecho de que el café se ha consumido durante mucho tiempo, pero solo recientemente ha ganado importancia por sus características diferenciadas, que siguen siendo desconocidas para la mayoría de los consumidores. Además de los atributos físicos, químicos y sensoriales frecuentemente citados, los atributos higiénico sanitarios también deben considerarse importantes para la producción de cafés de calidad y la satisfacción del consumidor (Díaz, 2020).

Calidad del café tostado

La uniformidad del color, después del tostado, es atributo de un café de buena calidad (Sánchez *et al.*, 2007). Los atributos sensoriales como la acidez, el cuerpo y la dulzura son importantes para la calidad de la preparación del café, además de afectar la dulzura, los carbohidratos simples, representados principalmente por sacarosa, glucosa y fructosa en el café, también participan en las reacciones de Maillard durante el proceso de tostado, afectando el aroma y características del color (Díaz, 2020).

Efectos Observables

La estructura del café, durante el proceso de tostado sufre un hinchamiento entre 40% - 60% con una pérdida de alrededor del 20% de su peso, al igual que la estructura del poro, la cual es dependiente de las condiciones de tiempo-temperatura de tostado aplicadas. Las matrices de poros expandidos de los granos de café tostados están compuestas de células evacuadas con una estructura de paredes celulares. Las células evacuadas con un diámetro de 20 a 40 micras pueden ser consideradas como macroporos basados en la clasificación del tamaño del poro de la Unión Internacional de Química Pura Aplicada. Además, existen nanoporos dentro de las paredes de la célula, con poros de diámetro típico del rango desde 20 hasta 50 nm que pueden ser considerados como mesoporos (Arcos *et al.*, 2014).

HIPÓTESIS

Las temperaturas en el proceso del tostado están ligadas a la capacidad antioxidante aprovechable del grano, a mayor temperatura menor capacidad antioxidante, en consecuencia, la temperatura de tueste óptimo para las mezclas de café *arábigo* y *catimor* es de 200°C para el mejor aprovechamiento compuestos bioactivos.

METODOLOGÍA

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo corresponde al paradigma de investigación cuantitativo. También se emplearon los enfoques de investigación descriptivo y experimental. La investigación descriptiva permitió caracterizar el color y las características microestructurales de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor*, los resultados fueron reportados como valor promedio acompañado de la desviación estándar. La investigación experimental permitió comparar las medias de los tratamientos de las de la capacidad antioxidante de polifenoles totales y de la captura de radicales libres ABTS y DPPH en la mezcla de café secado a 200, 215 y 225°C.

GRANOS DE CAFÉ

Los frutos de café se colectaron en el municipio de Motozintla de Mendoza; Chiapas, en las coordenadas geográficas: 15.31773 y -92.29151.

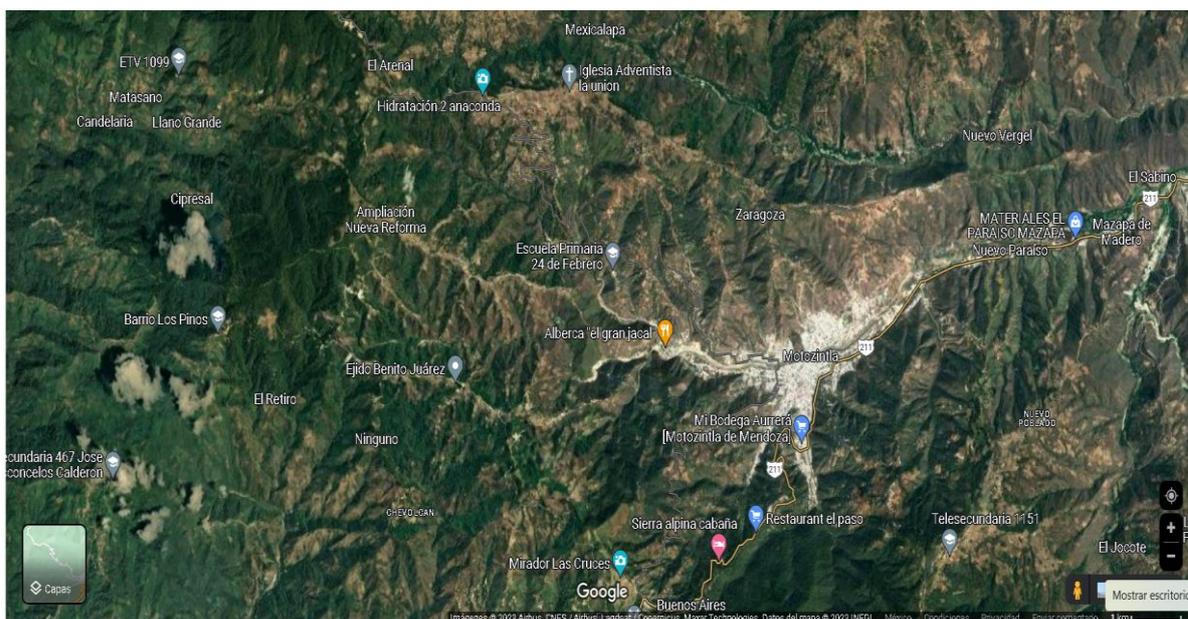


Figura 18. Ubicación geográfica de la zona de recolección del café (Google Maps, 2023).

MUESTRA

Se utilizaron muestras de café *Arábica* y *Catimor*, previamente molidos y tostados bajo los tratamientos de 200°C, 215°C y 225°C, fueron tomados 100g de muestra para análisis de color y 5 g para la microscopia de cada tratamiento.

VARIABLES

Las variables fueron evaluadas por fase de análisis, las cromáticas de (L^* , a^* y b^*) correspondientes a el análisis de colorimetría, Polifenoles totales, captura de radicales ABTS y Captura de radicales DPPH para Capacidad antioxidante y finalmente Características microestructurales y morfológicas por mezcla de café *Arábica* y *Catimor* secado a 200, 215 y 225 °C.

INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA DE MEDICIÓN

El equipo utilizado en la evaluación del color de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* fue el Colorímetro marca FRU modelo WR10QC (Shen Zhen Wave Optoelectronics Technology Co., Ltd; China).

Durante la determinación de la capacidad antioxidante, la mezcla se atempera y mezcló con un ThermoMix marca Eppendorf y un espectrofotómetro VELA UV-VIS.

Para identificar las características microestructurales y morfológicas de la mezcla de café se empleó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL (modelo IT300, Boston, MA, USA.)

DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS

A) COLOR EN GRANOS DE CAFÉ TOSTADO

El análisis de color se realizó sobre el punto central de las muestras, se evaluaron las variables (L^* , a^* y b^*), para lo cual se utilizó un colorímetro marca FRU modelo WR10QC (Shen Zhen Wave Optoelectronics Technology Co., Ltd; China) para los valores de CIE (Commission Internationale del Eclairage) de L^* , a^* y b^* . El parámetro a^* (cromatismo verde-rojo) toma valores positivos para colores rojizos y valores negativos para colores verdosos, mientras que el parámetro b^* (cromatismo azul-amarillo) toma valores positivos para colores amarillentos y valores negativos para colores azulados. L^* es una medición aproximada de luminosidad, la cual es una propiedad mediante la que cada color puede ser considerado como el equivalente a un punto de la escala gris, entre el negro y el blanco, incluyendo valores en el rango de 0-100 adicionalmente, a partir de los valores de a^* y b^* Se calcularon los valores de ángulo de matiz o tonalidad (b) y croma (C), de acuerdo a las siguientes ecuaciones (1) y (2), las cuales se obtuvieron datos numéricos y se analizaron mediante el análisis descriptivo.

$$H_* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$* = \sqrt{((a^*)^2 + (b^*)^2)} \quad \text{Ecuación (2)}$$

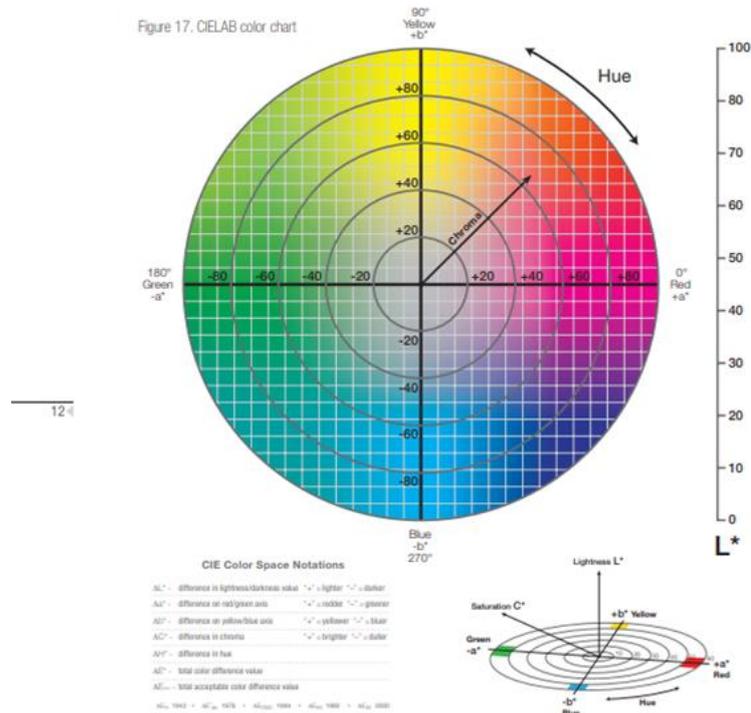


Figure 18. The L* value is represented on the center axis. The a* and b* axes

Figura 19. Escala CIE-Lab (XRITE, 2018).

B) CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE LA MEZCLA DE CAFÉ

Preparación y extracción de compuestos

Los extractos de café, se realizaron al 5% en etanol, agua y metanol, respectivamente. Cada muestra se trabajó por separado y se colocaron previamente pesadas en tubos falcón de 50 ml y se adicionó cada reactivo y se agitó en un ThermoMix marca Eppendorf a 1000 rpm 25 °C por 60 min protegido de la luz. Después las muestras se centrifugaron durante 20 min a 5000 rpm y el sobrenadante se transfirió a tubos de vidrio de color ámbar y se almacenaron en congelación hasta su uso.

DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS POLIFENOLES TOTALES

De los extractos antes indicados, se cuantificó el contenido de compuestos polifenólicos totales mediante el método Folin-Ciocalteu. El cual consistió en mezclar 200 μL de cada extracto con 200 μL de carbonato de sodio 0.01 M y se dejó reaccionar por 5 min, después se le adicionó 200 μL de reactivo Folin-Ciocalteu (1:1) y nuevamente se dejó reposar por 5 min, para luego adicionar 1250 μL de agua destilada, finalmente se dejó reaccionar por 30 min y se leyó en un espectrofotómetro VELA UV-VIS a 790 nm. Para la expresión del contenido se elaboró una curva de calibración con ácido gálico de 0 a 400 ppm para ser expresados en equivalentes de ácido gálico (EAG).

Procedimiento para la determinación de la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se determinó usando la técnica del DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) y ABTS (Ácido 2, 2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico). El radical DPPH se preparó en una concentración de 100 μM (3.9 mL) disuelto en metanol absoluto. Posteriormente, se añadió 0.1 mL de la muestra y fue homogeneizada y se mantuvo por 30 minutos en oscuridad. Finalmente, la absorbancia se midió a una longitud de onda de 517 nm en un espectrofotómetro.

La actividad antioxidante por el método ABTS se realizó de la siguiente manera: el radical se preparó a una concentración de 45 mM, se mezcló en partes iguales con persulfato de potasio 17 mM y se dejó reaccionar por 16 h en ausencia de luz temperatura ambiente, transcurrido el paso anterior, se ajustó la absorbancia del radical a 0.7 con PBS 0.15 M de pH 7.2. Seguidamente se mezcló 1 mL de radical ABTS con 10 μL muestra para dejarla reaccionar 10 min a temperatura ambiente en ausencia de luz; después de ser incubadas se leyó a la absorbancia 734 nm en un espectrofotómetro.

La actividad antioxidante evaluada por los dos métodos se expresó en % de captura mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de captura de Radical} = \frac{\text{Abs de Radical} - \text{Abs de la muestra}}{\text{Abs de Radical}} \times 100$$

C) CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES Y MORFOLÓGICAS DE LA MEZCLA DE CAFÉ *ARÁBICA* Y *CATIMOR* SECADO A 200, 215 Y 225 °C.

Se realizó un análisis morfológico de granos de café tostado mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) utilizando un microscopio JEOL (modelo IT300, Boston, MA, USA). Las condiciones de operación fueron 10 kV como voltaje de aceleración, la señal de electrones secundarios.

DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En la evaluación del color de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* tostado en tres temperaturas (200, 215, 225 °C) se hizo uso de la estadística descriptiva, los valores fueron representados como valor promedio acompañado de la desviación estándar. Para la capacidad antioxidante se empleó el diseño experimental en bloque completamente al azar se consideraron los tratamientos (T1= 215, T2= 220 y T3= 225 °C) cada uno con tres repeticiones. Los datos obtenidos fueron analizados con el paquete estadístico Minitab Versión 17, mediante un análisis estadístico ANOVA de una vía. Para la detección de las diferencias de las medias se empleó la prueba de Tukey con nivel de significancia de $P \leq 0.05$.

Tabla 4. Diseño experimental en bloques al azar para la evaluación antioxidante.

Capacidad antioxidante	T1 (200 °C)	T2 (215 °C)	T3 (225 °C)
Extracto Etanólico (EE)	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
Extracto Metanólico (EM)	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3
Extracto Acuoso (EA)	R1, R2, R3	R1, R2, R3	R1, R2, R3

*T1=tostado 200°C, T2= tostado 215°C, T3=225°C, R (repetición).

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados para cumplir con los objetivos de la investigación.

a) Color de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* tostado a 200, 215 y 225 °C.

Los tuestes del café se inclinan a los ejes cromáticos de a^* + y b^* +. El valor de L^* El más bajo se encontró en la mezcla de café tostado (T1) y el más alto en la mezcla de café tostado a 215°C. Valerio *et al.*, 2019, demostraron que el nivel de tostado es asociado principalmente al parámetro de color luminoso (L^*), con el que se mide el índice de oscurecimiento en los granos producto de las reacciones de caramelización, donde al aumentar el color oscuro en los granos disminuye su luminosidad.

El ángulo de color a^* indica mayor intensidad de color rojo en el T1 (18.52 ± 0.44) y verde en el T3 (7.31 ± 0.22) y el ángulo de color b^* Se mostró mayor intensidad en T1 (47.27 ± 1.88). Para considerar y establecer parámetros en relación comportamiento de tostado - temperatura en relación al color, T1, T2 y T3: $L^* = 11.63 \pm 1.27, 18.50 \pm 1.20, 15.03 \pm 0.47$. $a^* = 18.52 \pm 0.44, 10.28 \pm 0.86, 7.31 \pm 0.22$. y $b^* = 47.27 \pm 1.88, 5.45 \pm 0.55, 2.81 \pm 0.11$ se observa un aumento marcado en L^* con una pequeña reducción al final, en los valores de a^* se observa se observa una reducción constante en los valores, finalmente en b^* Se observa una reducción de valores bastante alta en comparación en T1 y T2, lo que nos podría indicar una diferencia notable en estos tratamientos respecto a los demás análisis, los cambios de colores ligados se podrían relacionar a la degradación de azúcares y polifenoles que aportan color.

Tabla 5. Resultados de color en la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* en tres temperaturas de tostado.

Muestra	L^*	a^*	b^*
T1	11.63 ± 1.27	18.52 ± 0.44	47.27 ± 1.88
T2	18.50 ± 1.20	10.28 ± 0.86	5.45 ± 0.55
T3	15.03 ± 0.47	7.31 ± 0.22	2.81 ± 0.11

b) Capacidad antioxidante de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* secado a 200, 215 y 225 °C.

Los compuestos fenólicos son antioxidantes importantes en el café, existe una relación estrecha entre su concentración y la capacidad antioxidante total en el grano.

El ácido clorogénico, es el polifenol más abundante en los granos de café.

De manera general, el tostado disminuye el contenido en polifenoles por su relación con la reacción de Maillard, apareciendo una amplia variedad de compuestos, entre los que se encuentran las melanoidinas, que van a aportar al café el aroma y sabor.

El mayor contenido de polifenoles totales se encontró en el Extracto Acuoso (EA), en este medio permite una mejor conservación de los compuestos activos. Se encontró 2.5% de polifenoles totales en la temperatura de 200°C, lo cual es significativamente mayor que en el extracto de etanol y metanol, la concentración de polifenoles totales decae con el incremento de la temperatura, sin embargo, la concentración de polifenoles totales es mayor en el EA en las temperaturas 215 y 225°C (figura 20).

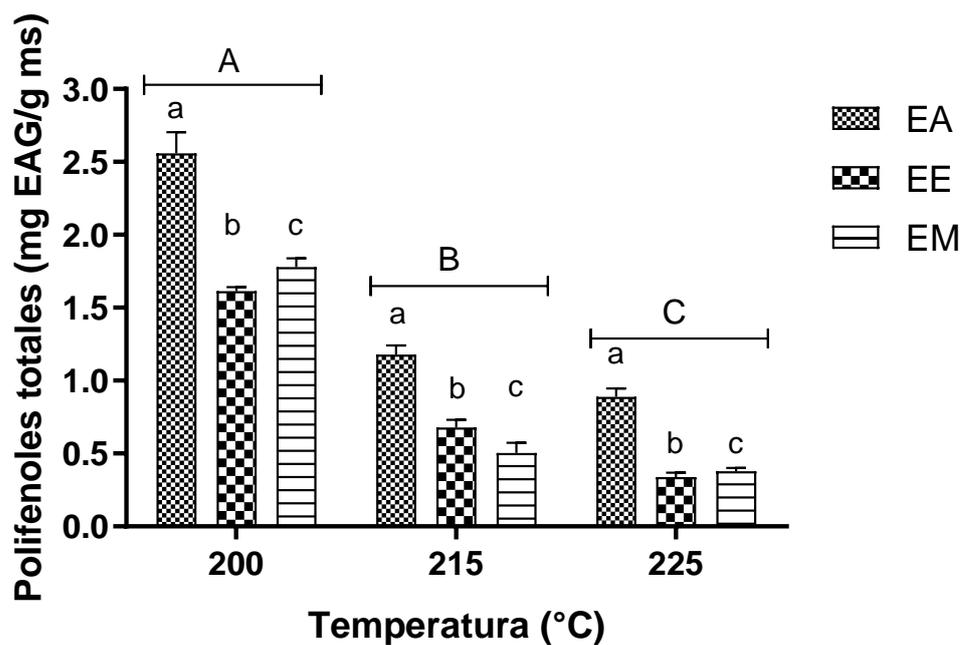


Figura 20. Polifenoles totales en EA, EE y EM a 200, 215 y 225 °C.

Diaz (2020), encontró el mayor contenido de polifenoles en tostado medio con 35.5 ± 0.8 mg AG/g y el menor contenido de polifenoles en tostado oscuro, $30,08 \pm 0.8$ mg AG/g, posiblemente atribuido a la termolabilidad y degradación por la condensación oxidativa, derivada de la acción de las enzimas oxidativas e hidrolíticas liberadas por la ruptura de las paredes celulares que destruyen a los antioxidantes y disminuyen el contenido de polifenoles.

c) Capacidad antioxidante total de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* tostado a 200, 215 y 225 °C.

ABTS

Este método se basa en la capacidad de los antioxidantes presentes en una muestra para neutralizar el radical ABTS, que se genera a partir de la oxidación del ABTS con un agente oxidante.

La mejor captura de radicales libres ABTS encontró en los extractos metanólicos (94.64 y 96.12%) en la temperatura de 200 y 225°C respectivamente, similar comportamiento se encontró para la mezcla de café en el extracto etanólico (81.54%) en temperatura de 215°C. La mejor captura de radicales libres se encontró en la temperatura de 200°C.

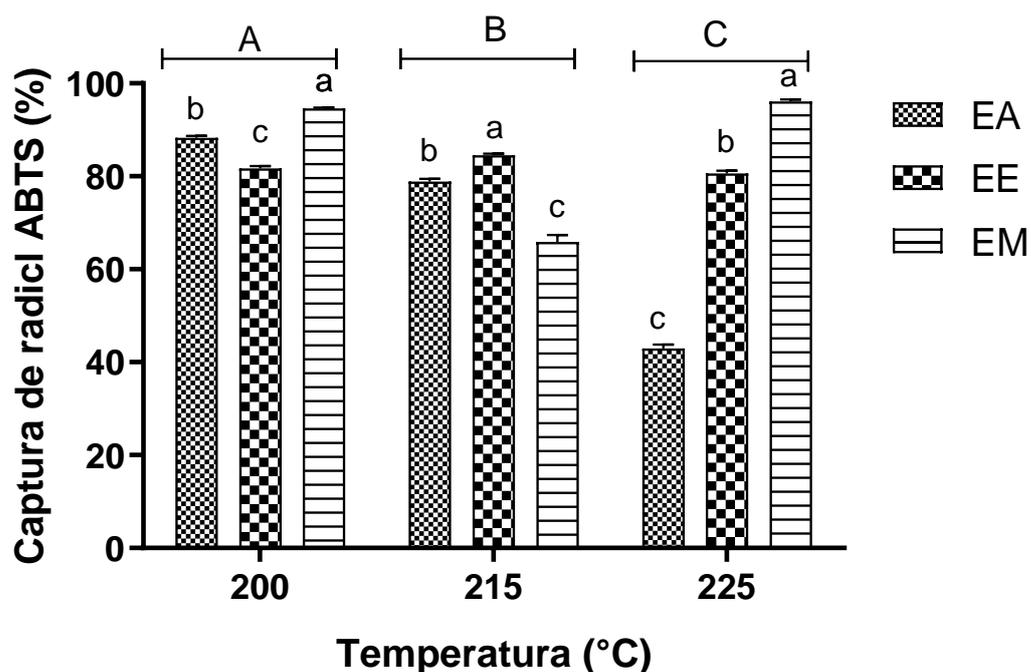


Figura 21. Captura de radicales ABTS a 200, 215 y 225°C.

Oboh *et al.*, observó una mayor actividad antioxidante, en el ensayo ABTS, en tostados claros que en verdes o cafés oscuros; obtuvo valores de IC_{50} de 0.74 ± 0.01 , 0.8 ± 0.01 , 0.82 ± 0.01 mg/mL en ABTS para tostado medio claro, medio y medio oscuro.

DPPH

Se basa en la reducción de la absorbancia medida a 515 nm del radical 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH•) el cual se reduce en presencia de antioxidantes manifestándose un cambio de color.

Se encontró diferencia estadística significativa en la captura de radicales libres por el método DPPH. La mejor captura de radicales se encontró en la temperatura de 215 °C seguido de la temperatura de 200 y 225°C. La mejor captura de radicales se encontró en la temperatura de 215 °C los cuales fueron similares en el EA y EE en promedio se reporta un valor de 91.76%

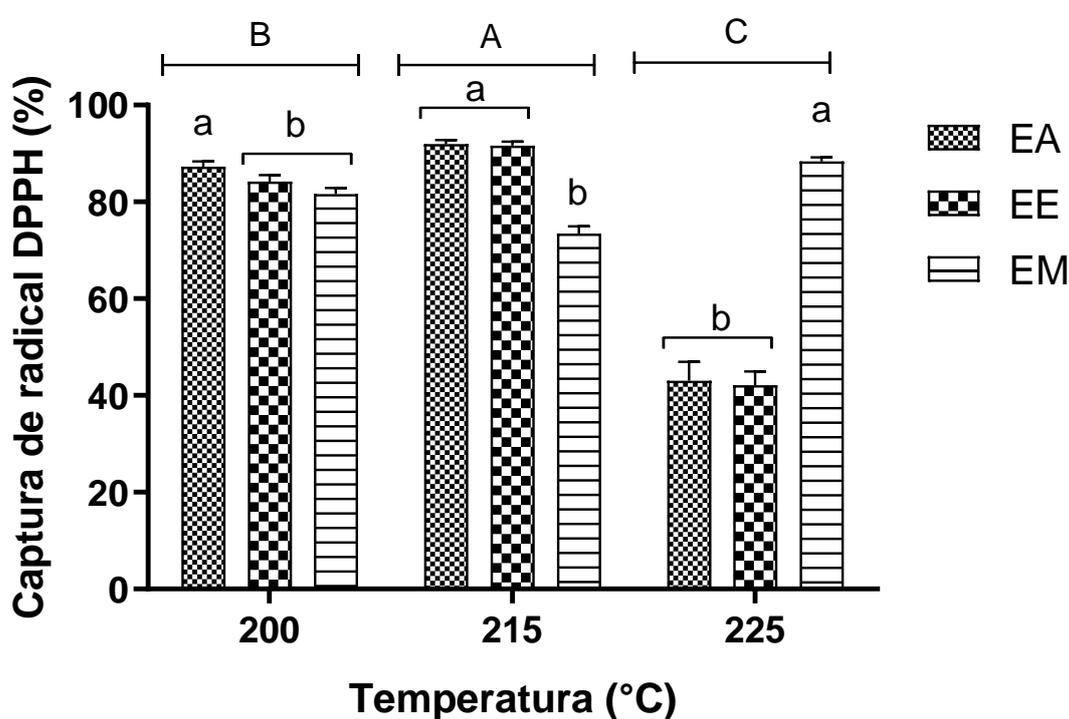


Figura 22. Captura de radical DPPH (%) a 200, 215 y 225°C.

La capacidad de inhibición varía con el tostado, ya que algunos compuestos disminuyen y otros aumentan, esto puede deberse a los compuestos volátiles pueden ser derivados de distintos precursores, que se degradan en proporciones diferentes durante el tostado. Las melanoidinas también pueden contribuir a la función antioxidante del grano, algunos autores han demostrado que esta capacidad atribuida normalmente a los compuestos polifenólicos, incluidos el ácido clorogénico, cafeico, ferúlico, cumárico, etc, también puede relacionarse a compuestos no fenólicos como la cafeína, el ácido nicotínico y la trigonelina. Esto, compensa

probablemente, la disminución de los ácidos clorogénicos que se produce al tostar. La capacidad antioxidante máxima se ha observado en el café medianamente tostado.

Somporn (2011), reporto una disminución en la actividad de captación de radicales del DPPH en el orden de tostado, 0.52% para tostado ligero, 2.07% para tostado medio y 10.26% para tostado oscuro.

d) Características microestructurales de la mezcla de café *Arábica* y *Catimor* tostado a 200, 215 y 225 °C.

Durante la observación al microscopio de los granos de café, verdes o tostados, se observa la típica estructura enrollada del tejido parenquimático. En la zona del mucílago central se observa la formación de cavidades durante el tueste, estas contribuyen al aumento de volumen producido durante el mismo. Se pueden distinguir tres fases importantes en el café tostado: las paredes celulares, los residuos amorfos y la fase lipídica.

La microestructura del café se puede describir como una red de cavidades celulares prácticamente vacías y escasamente comunicadas entre sí a través de grietas en las paredes celulares de naturaleza polimérica (figura 23).

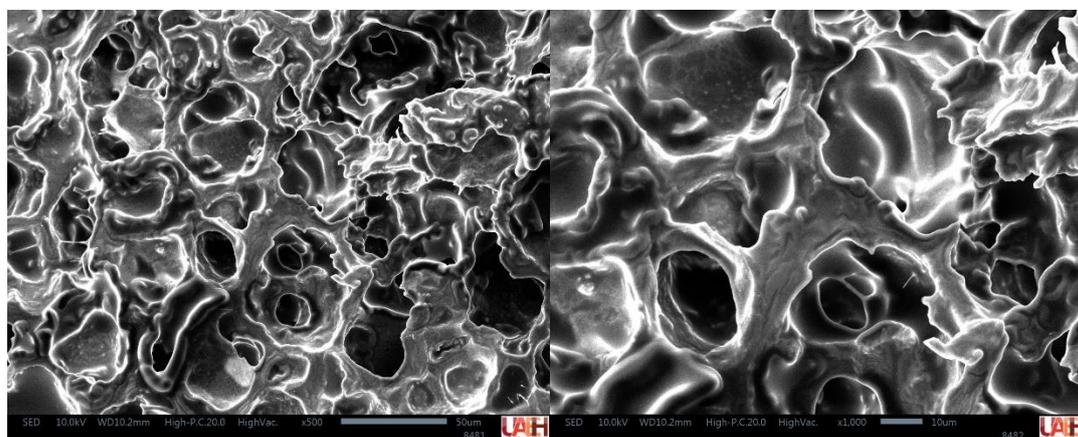


Figura 23. Microfotografías del grano de café verde.

Al tostar los granos de café pierden su fuerza y dureza, haciéndose más frágiles. Las reacciones químicas y los cambios fisicoquímicos que tienen lugar durante el tostado (deshidratación, oscurecimiento no enzimático, pirólisis) alteran grandemente la estructura celular. Estos cambios, se deben principalmente a la alta presión interna generada por los Gases liberados como consecuencia del tratamiento térmico, lo que se traduce en un aumento en el volumen del grano y de su porosidad.

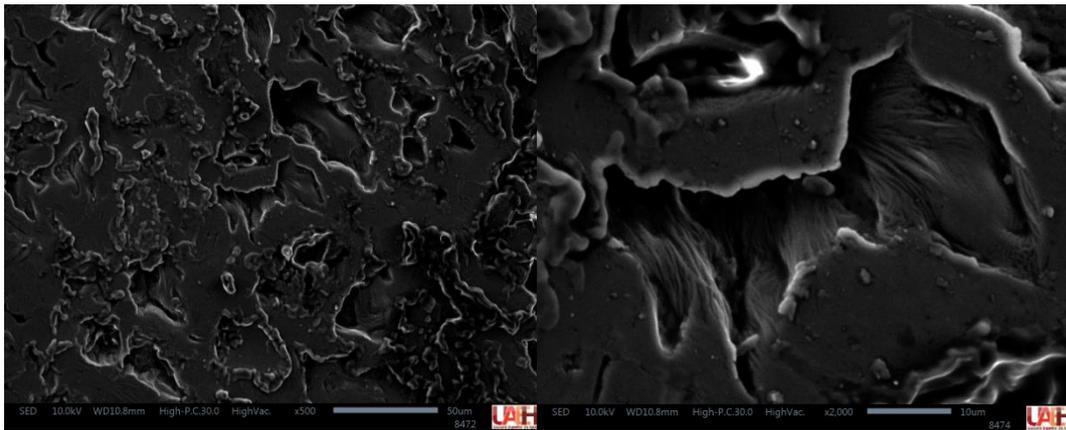


Figura 24. Microfotografías del grano de café tostado a 200°C

Los valores de porosidad oscilan entre 0.38 y 0.64 en función de la intensidad del tostado y el origen del grano.

En las siguientes imágenes se puede observar que la estructura y el número de poros aumentan al aumentar la intensidad y el tiempo de tostado, debido a la ruptura de enlaces en la estructura interna en los granos de café, coincidiendo con lo reportado por Schenker *et al*, 2000.

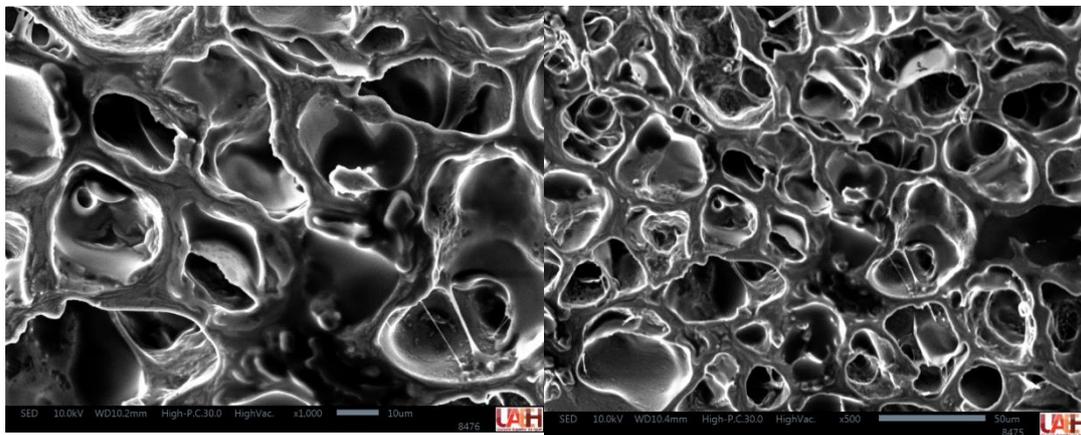


Figura 25. Microfotografías del grano de café tostado a 215°C.

Se observa también que la densidad de los granos disminuye debido al aumento en el volumen de los poros y la pérdida de peso, por lo que la distribución del tamaño de los poros cambia con el aumento en la temperatura.



Figura 26. Microfotografías del grano de café tostado a 220°C

Pueden ser observadas algunas diferencias en la superficie de los granos, esto se debe a que el tratamiento térmico, afecta al grano de café en función a su variedad y origen; en esta investigación fue analizado el efecto en las mezclas de café más importantes que se comercializan en esta región del país.

CONCLUSIÓN

El tostado es un proceso físico químico a través del que las características del café verde son alteradas para producir otros componentes; es una transformación que produce cambios en las características físicas de los granos, pérdida de agua, expansión de su volumen, se oscurecen y se vuelven frágiles, además de desarrollar un perfil característico de sabor y aroma. Durante la torrefacción, se producen compuestos aromáticos volátiles y pigmentos marrones poliméricos, mientras que se liberan agua y dióxido de carbono.

En las mezclas de café *arábiga* y *catimor*, a mayor intensidad del tostado se producen más cambios en el grano de café, lo que no siempre es idóneo, por lo que el color, la capacidad antioxidante y los cambios microestructurales más favorables se encuentran alrededor de los 200°C.

Es importante resaltar, que el origen y la variedad del grano de café influye en los efectos del tostado, por lo que es necesario realizar la evaluación de su comportamiento frente a esta etapa del proceso.

REFERENCIAS DOCUMENTALES

ALFARO PILLIHUAMÁN, Elvi. Capacidad antioxidante del *Coffea arabica* “café” de cinco departamentos del Perú, Ayacucho 2017. 2019. Disponible en: <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/4422>

ARCOS AVILA, Carlos Andrés, *et al.* Estudio del comportamiento de la microestructura de café y ácidos clorogénicos durante el proceso de torrefacción estudio de caso tecnoparque agroecológico yamboró. 2014.

AYALA ZAVALA, JESÚS. *Capacidad antioxidante de una bebida fermentada elaborada a partir de puré de papaya (Carica papaya L.) variedad Maradol.* Tesis de ingeniería., instituto tecnológico de Ayala., 2022.

BEDOYA, Jose. *Campesino secando café Sevilla Valle Colombia Municipio patrimonio de la humanidad | Valle Colombia, Sevilla, Patrimonio de la humanidad.* Imagen. [s. f.]. Disponible en: <https://www.pinterest.com.mx/pin/292734044500047642/>. [consultado el 24/10/2023].

BELDA PALAZÓN, Cristina. *La fermentación aplicada a la mejora de las propiedades funcionales de residuos y subproductos de alimentos de origen vegetal.* En línea. Tesis de maestría. valencia: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, 2022. Disponible en: RiuNet, <https://riunet.upv.es/>.

BLANCO-NAVARRO, Moisés, *et al.* Morfología del café (*Coffea arabica* L.), en lotes comerciales. Nicaragua. *Agronomía Mesoamericana*, 2003, p. 97-103.

CASTELLANO, Nicholas. Variedad de Café *Bourbon*: Guía Para Productores y Tostadores. Perfect Daily Grind [en línea]. 8 de febrero de 2020. Disponible en: <https://perfectdailygrind.com/es/2020/02/28/variedad-de-cafe-bourbon-guia-para-productores-y-tostadores/>

CHAVEZ, carolina y patricia ESQUIVEL. Ácidos clorogénicos presentes en el café: capacidad antimicrobiana y antioxidante. *Universidad de Costa Rica*. 2019, (ISSN 2215-3608, doi:10.15517/am.v30i1.32974).

COELLO, Franklin y Tony RAMBOTTINI. Cafeína, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en granos de café orgánico (*Coffea arabica*, var. *Caturra*) sometidos a tres tiempos de tostado, Nirgua, estado Yaracuy, Venezuela. *CIENCIAS BÁSICAS Y TECNOLOGÍA*. 2022, **33**, 20–27. ISSN 10.5281/zenodo.77248.

CORTÉS LOEZA, Hernán, SECRETARIA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (AGRICULTURA) y SERVICIO DE LA INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (SIAP). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. En línea. oficio. Dirección de Análisis Estratégico, 2022. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/732617/Caf_Mayo.pdf.

CORTINA GUERRERO, Hernando A., María del Pilar MONCADA BOTERO y Juan Carlos HERRERA PINILLA. Avances técnicos. *CENICAFE, Gerencia Técnica / Programa de Investigación Científica Fondo Nacional del Café* [en línea]. 2012. ISSN - 0120 - 0178. Disponible en: https://kimera.com/data/redlocal/ver_demos/RLCF/RECURSOS/BIBLIOTECA%20CAFETERA/F%20-%20CULTIVO%20CAFE%20INDICACIONES/variedad%20castillo.pdf

CRUZ VELÁSQUEZ, Sully Margot. Evaluación de la actividad antioxidante y detección de marcadores químicos en extractos de hojas y granos de siete variedades de café comercializadas en Guatemala. 2018. Disponible en : <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puicb/INF-2018-12.pdf>

DELGADO PAISIG, Patrick Michael; JIBAJA BARBOZA, José Luis. Efecto del Tiempo de Fermentado, Tipos de Secado y Dos Tipos de Riego en la Calidad de Café (*Coffea arabica* L.) Var. *Catimor*. En Nivel Altitudinal Bajo. En el Centro Poblado Las Naranjas. provincia de Jaen-Reg. Cajamarca. 2017.

DÍAZ DELGADO, María de Guadalupe. “Evaluación sensorial, capacidad antioxidante y polifenoles totales de mezclas de café arábica variedad *caturra* y *catimor*”. En línea. Tesis de posgrado. Tingo María: UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA, 2020. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1843>.

ENRÍQUEZ-VALENCIA, Ayda Lilia, *et al.* Caracterización por colorimetría de accesiones de plátano del Sistema de Bancos de Germoplasma en Colombia. *Acta Agronómica*, 2020, vol. 69, no 1, p. 7-13. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1699/169965185001/html/#c2>.

Cafeaconcagua. *Fermentación del café*. Imagen. 15/11/2022. Disponible en: <https://cafeaconcagua.cl/blogs/cafero/es-clave-en-el-proceso-del-cfae#:~:text=Fermentación%20sólida;a%20ser%20lavado%20y%20secado>. [consultado el 24/10/2023].

FERMÍN, Nayive, *et al.* Evaluación de la calidad fisicoquímica y sensorial de tres marcas comerciales de café tostado y molido. *Revista Científica UDO Agrícola*, 2012, vol. 12, no 2, p. 428-438. Disponible en : <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4688602>

FERRARI, alejandro. *Alimentos fermentados : microbiología, salud y cultura*. Alejandro FERRARI, gabriel VINDEROLA y ricardo WEIL (eds.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Instituto Danone del Cono Sur., 2020. ISBN 978-987-25312-2-5.

FLORES VICHI, Felipe. *La producción de café en México: ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas Autores/as Felipe Flores Vichi*. En línea. revista digital de la universidad autonoma de chiapas, vol. 4 (2015), n.º 7. Disponible

HENAO ARISMENDY, Juliana. *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. 2015. Tesis Doctoral.

HEREDIA MIRA, Francisco José, *et al.* Investigación en color y calidad de alimentos. 2016.

HERNANDEZ PEREZ, Ramón. *TOSTACION DE CAFE Es el proceso trmico al*. Imagen. 03/11/2012. Disponible en: <https://slidetodoc.com/tostacion-de-cafe-es-el-proceso-trmico-al/>.

JAMANCA GONZALES, Nicodemo Crescencio y Sarela Carmela ALFARO CRUZ. *Antioxidantes en los alimentos*. En línea. Universidad Nacional de Barranca (UNAB.), 2017. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12935/17>.

JUÁREZ, Ángel; DE JESÚS, Samuel. *Estudio de la fracción lipídica de dos variedades híbridas de café a diferentes perfiles de temperatura de tostado*. En línea. Posgrado. H. Veracruz Ver. México: TECNOLOGICO NACIONAL DE MÉXICO, Instituto Tecnológico de Veracruz, 2019.

Disponible en: Tecnológico Nacional de México, <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/2523>.

LAZCANO, E., *et al.* Efecto del grado de tostado en granos de café de diferentes regiones productoras de México sobre el contenido de compuestos fenólicos, cafeína y la actividad antioxidante. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos, México*, 2016, vol. 1, p. 478-483. Disponible en : <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/3/82.pdf>.

LÓPEZ TRICAS, José Manuel. *El café, origen, química y efectos* -. En línea. info-farmacia. 12/01/2015. Disponible en: <http://www.info-farmacia.com/historia/el-cafe-origen-quimica-y-efectos>.

LUNA GONZÁLEZ, Alejandro, *et al.* Cup quality attributes of Catimors as affected by size and shape of coffee bean (*Coffea arabica* L.). *International Journal of Food Properties*, 2019, vol. 22, no 1, p. 758-767.

MEDINA-MELÉNDEZ, José Alfredo, *et al.* Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. *CienciaUAT*, 2016, vol. 10, no 2, p. 33-43. Disponible en <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v10i2.550>

MENJO, Chemjong, Nirupa KUMARI YADAV, AARZOO, Sarkate ANKITA y Yaqoob MUDASIR. *BIOACTIVE COMPOUNDS, TYPES, STABILITY AND HEALTH BENEFITS*. En línea. 21ª ed. Jalandhar: Plant Archives, 2021. ISBN 2581-6063 (online). Disponible en: [http://plantarchives.org/SPECIAL%20ISSUE%202021-1/300%20\(1863-1869\).pdf](http://plantarchives.org/SPECIAL%20ISSUE%202021-1/300%20(1863-1869).pdf).

MERCADO-MERCADO, Gilberto, *et al.* Compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante de especias típicas consumidas en México. *Nutrición hospitalaria*, 2013, vol. 28, no 1, p. 36-46.

MUSSATTO, Solange I., Ercília M. S. MACHADO, Silvia MARTINS y José A. TEIXEIRA. *Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues*. En línea. *Food and Bioprocess Technology*, vol. 4 (marzo de 2011), n.º 5, pp. 661–672. ISSN 1935-5149. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>.

NARANJO, David. *Métodos de secado del café | Todos los procesos*. En línea. Café calentito. 28/09/2023. Disponible en: <https://cafecalentito.com/los-metodos-de-secado-del-cafe/>.

PACHECO-COELLO, Franklin *et al.* Variación de la actividad antioxidante por efecto del tostado en granos de café (*Coffea arabica*), estado Miranda, Venezuela. *Ciencia, Ambiente y Clima* [en línea]. 2020, **3**(2), 49–56 [consultado el 13 de septiembre de 2023]. ISSN 2636-2333. Disponible en: doi:10.22206/cac.2020.v3i2.pp49-56.

PAITÁN, Humberto Ñaupas, *et al.* *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U, 2014.

PAUCAR ANCHIRAYCO, JUAN ABEL,. *“Influencia del tostado en los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de granos de café (coffea arabica L.) de satipo”*. En línea. Pregrado. SATIPO: 1 UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS TROPICAL, 2010. Disponible en: UNPC, <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1886>.

PÉREZ OCHOA, Mónica Lilian. *Compuestos fenólicos y perfil de ácidos grasos en granos de café (Coffea arabica L.) verde y tostado de variedades e híbridos cultivados en Coatepec, Veracruz*. En línea. Posgrado. Xalapa de Enríquez: Universidad Veracruzana, Instituto De Ciencias Básicas, 2016. Disponible en: <https://www.uv.mx/mca/files/2018/01/I.-en-A.-Monica-Lilian-Perez-Ochoa.pdf>.

PÉREZ-HERNÁNDEZ, Lucía Margarita, *et al.* Compuestos fenólicos, melanoidinas y actividad antioxidante de café verde y procesado de las especies *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. *BIOtecnica*, 2013, vol. 15, no 1, p. 51-56.

PUERTA, G. I.; ECHEVERRY, J. G. *Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), 2015.

RAMÍREZ, Meregildo Silva; SANTILLAN, Luz Milene Santillan. Comparación de efectos secado de taza de café catimor rojo (*Coffea arabica*) y café nacional típico. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2021, vol. 4, no 1, p. 09-13.

ROJO JIMÉNEZ, Elena y Carril Elena PÉREZ URRÍA. *Café I (G. Coffea)*. En línea. REDUCA (Biología), vol. 7 (2014), n.º 2. ISSN 1989-3620. Disponible en: <https://docta.ucm.es/entities/publication/c2538d0a-1ac5-45c7-a7d4-4489985f10d1>.

SADH, Pardeep Kumar, *et al.* Fermentation: A boon for production of bioactive compounds by processing of food industries wastes (by-products). *Molecules*, 2018, vol. 23, no 10, p. 2560.

SÁNCHEZ DE LA CRUZ, Inder Gley; MUÑOZ OLIVARES, Segundo Víctor. Efecto de la adición de levadura (*Saccharomyces* sp) en el proceso de fermentación de café (*Coffea arabica*). *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 2019, vol. 3, no 1, p. 28-36.

SÁNCHEZ-RAMÍREZ, J., *et al.* Estudio de la hidrodinámica del café tostado (*Coffea arabica* L.) en lecho fluidizado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2007, vol. 6, no 2, p. 185-192.

TARIGAN, E. B., *et al.* The changes in chemical properties of coffee during roasting: A review. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2022. p. 012115.

TOMÁS BARBERÁN, Francisco. *Los polifenoles de los alimentos y la salud*. En línea. 2ª ed. Vol. 10. DIGITAL.CSIC, 2003. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/18042>.

VELÁSQUEZ OROZCO, Rafael Alberto. guía de variedades de café, Guatemala. *Asociación Nacional del Café, Anacafé* [en línea]. 2019, 2, 5–6. Disponible

VICENSUTO, Gabriela Mourad; DE CASTRO, Ruann Janser Soares. Development of a novel probiotic milk product with enhanced antioxidant properties using mango peel as a fermentation substrate. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, vol. 24, p. 101564. en: <https://www.anacafe.org/uploads/file/9a4f9434577a433aad6c123d321e25f9/Guía-de-variedades-Anacafé.pdf>

WEI, Feifei; TANOKURA, Masaru. Chemical changes in the components of coffee beans during roasting. En *Coffee in health and disease prevention*. Academic Press, 2015. p. 83-91.

X.RITE. *LAB Color Space and Values* | X-Rite Color Blog. En línea. X-Rite. 08/10/2018. Disponible en: <https://www.xrite.com/blog/lab-color-space>.