



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ingeniería Química
Colegio de Ingeniería Química



DIFERENCIACIÓN DE EXTRACTOS DE CAFÉ DE ESPECIALIDAD (*Coffea arabica*) OBTENIDOS POR DISTINTOS MÉTODOS MEDIANTE ANÁLISIS DE CUANTIFICACIÓN DE COMPUESTOS NO VOLATILES POR HPLC Y FTIR

Tesis que para obtener el título de
Licenciatura en Ingeniería Química

PRESENTA:

Pamela Pozos Velázquez

Director de tesis: Dr. Héctor Ruiz Espinosa

Asesor: Dr. Genaro Gustavo Amador Espejo
SECIHTI-IPN Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada

H. Puebla de Z., septiembre 2025

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más grande agradecimiento a todas las personas que han sido parte en este proceso y que me ayudaron a culminar este proyecto.

En primer lugar, agradezco enormemente a mi director de tesis el Dr Héctor Ruíz y mi asesor el Dr. Genaro Amador por su constante apoyo, paciencia y por todos los conocimientos adquiridos a través de ustedes que fueron fundamentales para hacer posible este proyecto, además agradezco su calidez humana hacia conmigo que permitió sentirme confiada en todo el proceso.

Expreso mi agradecimiento también a todos los buenos docentes de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP que formaron parte de mi formación académica, en especial a la Maestra Madai Sánchez que me apoyó a lo largo del camino y también me brindó su amistad.

A mis amigos con quienes compartí momentos inolvidables en toda la licenciatura, en especial a Aline y Stefany que fueron parte importante en mi vida universitaria y que ahora son mis hermanas de vida.

Mi especial agradecimiento a Luis Fernando, Anita y Leti que son personas muy especiales en mi vida y con quienes compartí toda la experiencia sensorial del café en nuestras salidas a conocer cafeterías de especialidad.

Y finalmente pero no menos importante mi profundo agradecimiento a mi familia, mis papás y mis hermanos que son todo para mí y que han sido mi pilar toda mi vida, agradezco todo su apoyo en esta etapa. A mis papás les agradezco todo en la vida y en este momento les doy gracias por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, los amo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	5
HIPÓTESIS	5
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 Aspectos botánicos del café.....	6
1.2 Estructura de la cereza	7
1.2 Especies de café	8
1.3.1 Coffea arábica.....	9
1.3.2 Especie robusta	10
1.3 Producción Internacional, nacional y regional de café.....	11
1.5.1 Método seco o natural	13
1.5.2 Método húmedo o lavado.....	14
1.5.3 <i>Honey</i>	15
1.6 Grano verde.....	16
1.7.1 Proceso de tueste.....	18
1.7.2 Niveles de tostado.....	19
1.8 Reacciones Químicas durante el tostado	20
1.9 Café de especialidad.....	21
1.10 Métodos de extracción.....	23
1.10.1 Métodos de extracción para cafés filtrados.....	24
1.11 SCA.....	27
1.12 Compuestos no volátiles en café	28
1.12.1 Ácido clorogénico	29
1.12.2 Cafeína.....	30
1.12.3 Trigonelina.....	30
1.13 HPLC (Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento)	31
1.14 FTIR (Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier)	32
2. METODOLOGÍA	33

2.1 Materiales y equipos	33
2.1.1 Para la preparación de café en taza:.....	33
2.1.2 Para el análisis de las muestras:	33
2.2 Métodos	34
2.2.1 Fase 1: Estandarización de la técnica de preparación de extractos de café de especialidad.....	34
2.2.2 Fase 2: Análisis de las muestras de café en HPLC	38
2.2.2.4 Muestras de extractos de café de especialidad en HPLC	40
2.2.3 Fase 3: Análisis de las muestras de café por FTIR	40
2.2.4 Fase 4: Pruebas fisicoquímicas	41
2.2.5 Fase 5: Diseño experimental y análisis PCA	42
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1 Curvas de calibración.....	44
3.1.1 Curva de calibración ácido clorogénico	44
3.1.2 Curva de calibración cafeína	45
3.1.3 Curva de calibración de trigonelina	45
3.2 Concentraciones en extractos de café	46
3.2.1 Concentraciones obtenidas en HPLC	46
3.3.2 Análisis de varianza para café verde.....	56
3.3 Análisis de FTIR	57
3.4 PCA	58
3.5.1 PCA de café tostado	58
3.5.2 PCA de café verde	60
4. CONCLUSIONES	62
5. TRABAJO FUTURO	63
6. REFERENCIAS	64
7. ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempos de extracción para la estandarización de la técnica	38
Tabla 2. Concentración de cafeína en extractos de café de especialidad (mg/g)	46
Tabla 3. Concentración de trigonelina de los extractos de café de especialidad (mg/g)...	48
Tabla 4. Concentración de ácido clorogénico de los extractos de café de especialidad (mg/g)	49
Tabla 5. pH de los extractos de café de especialidad	50
Tabla 6. Grados Brix de los extractos de café de especialidad	51
Tabla 7. Valores de luminosidad L* de los extractos de café de especialidad	52
Tabla 8. Valores de la coordenada a* de los extractos de café de especialidad	53
Tabla 9. Valores de la coordenada b* de los extractos de café de especialidad	54
Tabla 10. Acidez titulable de los extractos de café de especialidad	55
Tabla 11. Concentración de cafeína, trigonelina y ácido clorogénico en los extractos de café verde (mg/g).....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Micrografía a 25X del filtro de papel para V60	27
Figura 2. Micrografía a 25X del filtro de papel para Kalita	27
Figura 3. Kalita Wave 155 (Co., Japón)	35
Figura 4. V60 (Hario, Japón).....	35
Figura 5. Café molido en el tamiz.....	36
Figura 6. Extracto de café recién hecho.....	37
Figura 7. Blooming: primera etapa de la extracción	37
Figura 8. Curva de calibración de ácido clorogénico	44
Figura 9. Curva de calibración de cafeína.....	45
Figura 10. Curva de calibración de trigonelina	45
Figura 11. Número de onda donde se identifica el estándar de cada compuesto.....	58
Figura 12. a), b) y c) gráficos en 3D del PCA para café tostado desde diferentes perspectivas	59
Figura 13. a) y b) gráficos en 3D del PCA para café verde desde diferentes perspectivas	61

INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas más populares y consumidas a nivel mundial. Las variaciones de sabor y aroma que emanan de una taza han permitido generar nuevas experiencias tanto sensoriales como estimulantes entre quienes lo consumen. Estas variaciones dependen principalmente de la variedad del grano empleada (arábica o robusta) y de los procesos a los que son sometidos los granos, desde el beneficiado —es decir, la obtención de la semilla de café— hasta el tipo de tostado y el método de extracción utilizado para su preparación.

Aunque el proceso de producción varía en cada región geográfica, existen fundamentos comunes cuyo objetivo es obtener granos de alta calidad. Con el tiempo, estos procesos han evolucionado mediante la incorporación de nuevas técnicas, las cuales modifican algunas propiedades del café y permiten ofrecer productos con características diferenciadas y atractivas para diversos consumidores.

En años recientes, el consumo de café de calidad superior con mejores perfiles en taza y un adecuado procesamiento de los granos ha ganado relevancia, especialmente entre los consumidores más conocedores, dando lugar a una tendencia creciente en torno al café de especialidad. Esta categoría incluye tanto los granos verdes como el café preparado en barras especializadas. El café de especialidad se distingue por poseer características únicas y, sobre todo, por una trazabilidad rigurosa que abarca cada etapa de su cadena productiva, desde el origen y la ubicación geográfica de la finca hasta la variedad del grano, las prácticas agrícolas, el beneficiado y el proceso de tostado.

Al ser producido bajo estándares de calidad estrictos y mediante una trazabilidad bien definida a lo largo de todas las etapas del proceso, que en muchos casos se realiza de forma artesanal, el café de especialidad suele tener un mayor valor comercial. Esta retribución más alta permite a los cafecultores cubrir los costos asociados a su producción, lo cual representa un incentivo para su cultivo y comercialización. Además, ante las nuevas tendencias de consumo, se ha buscado otorgar un valor agregado al producto, vinculando la calidad con el cuidado del

medio ambiente y una atención minuciosa en cada detalle (Luna González et al., 2022).

Preparar una taza de café de alta calidad no es una tarea sencilla. Una vez obtenidos los granos con características sobresalientes, es fundamental seleccionar un método de extracción adecuado. Las diferencias sensoriales derivadas del uso de distintos métodos de preparación con un mismo café pueden ser notables. Por tanto, elegir el método correcto permite resaltar los perfiles sensoriales que caracterizan al grano. Cada técnica de extracción requiere equipos específicos, lo que implica una serie de herramientas y conocimientos técnicos necesarios para llevar a cabo el proceso correctamente (Lee, 2021).

Actualmente, existen diversos métodos de extracción cuyo objetivo es obtener lo mejor del grano de café. Todos comparten principios similares, aunque difieren en aspectos clave como la aplicación de presión, la inmersión, la filtración o el tipo de equipo utilizado.

En el ámbito del café de especialidad, los baristas —personas capacitadas en técnicas de preparación de bebidas a base de café— desempeñan un papel fundamental. Estos profesionales suelen recomendar determinados métodos de extracción en función del tipo de grano y del perfil sensorial que se desea destacar. No obstante, la percepción de sabor, aroma y textura en boca (*mouthfeel*) es altamente subjetiva; por ello, la evaluación sobre si un café se considera de calidad o no depende en gran medida del gusto personal del consumidor.

Las técnicas de análisis instrumental más utilizadas para evaluar una bebida como el café suelen implicar el uso de insumos costosos y demandar un tiempo considerable para el procesamiento de muestras e identificación de compuestos. Por ello, ha surgido el interés en desarrollar técnicas instrumentales emergentes que permitan analizar extractos de café de forma más eficiente, rápida y económica. Este tipo de herramientas podrían facilitar la evaluación de diferencias entre métodos de extracción, ayudando a identificar cuál de ellos transfiere de forma más eficaz las propiedades sensoriales y funcionales del grano.

La extracción del café consiste en la obtención de compuestos solubles del grano mediante la adición de agua, y se lleva a cabo a través de una secuencia de

pasos: primero, la absorción de agua por los granos molidos; posteriormente, la transferencia de compuestos hidrosolubles al agua; y finalmente, la separación de los sólidos insolubles (Córdoba et al., 2020). En la actualidad, existen diversas herramientas que permiten realizar estos pasos bajo condiciones controladas, favoreciendo la obtención de bebidas con mayor calidad. No obstante, es importante señalar que los procesos previos a la extracción —como el tipo de grano, el tueste o la molienda— también influyen significativamente en el resultado final.

De acuerdo con Lee (2021), los métodos de preparación de café pueden clasificarse en cuatro categorías principales: 1) presión, 2) inmersión, 3) decocción y 4) filtración o goteo. En los métodos basados en presión, como el espresso, la extracción se realiza mediante la aplicación de agua a alta presión. En los métodos por inmersión, como la prensa francesa, el café molido se remoja con agua caliente en un proceso de maceración. La decocción, por otro lado, implica calentar conjuntamente el agua y el café molido hasta llevarlos a ebullición, como en la preparación tradicional turca. Finalmente, en la filtración o goteo, el agua atraviesa el café molido mediante un medio filtrante, y los resultados pueden variar según el tipo de vertido, la temperatura del agua y el tipo de filtro utilizado.

Las técnicas más utilizadas para determinar diferencias en taza de café suelen ser de tipo cromatográfico, como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Sin embargo, este tipo de análisis implica altos costos debido al uso de reactivos de alta pureza, equipos especializados y procedimientos de pretratamiento complejos. Como alternativa, han surgido técnicas instrumentales emergentes de análisis rápido y con costos más accesibles, como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

La técnica FTIR permite identificar compuestos a partir del análisis de su espectro de absorción de radiación infrarroja en la región del infrarrojo medio. Cuando se acopla con el módulo de reflexión total atenuada (ATR), esta técnica puede aplicarse directamente sobre muestras líquidas o semisólidas, permitiendo detectar compuestos tanto volátiles como no volátiles presentes en bebidas como el café preparado (Lyman et al., 2003). Estudios previos han demostrado que FTIR-

ATR puede emplearse eficazmente para identificar componentes que influyen en las propiedades sensoriales de la bebida.

Por ejemplo, Stanek et al. (2021) utilizaron FTIR para analizar café preparado mediante el método de *cold brew*, observando diferencias en la composición química, propiedades sensoriales y capacidad antioxidante en función de los parámetros de extracción utilizados. Por otro lado, Awwad et al. (2021) describieron una técnica basada en HPLC para determinar la concentración de cafeína y ácido clorogénico en muestras de café verde y tostado, demostrando que el nivel de tostado afecta significativamente la presencia de estos compuestos bioactivos.

Las propiedades químicas y sensoriales del café pueden verse significativamente influenciadas por múltiples variables a lo largo de todo su proceso de producción, entre ellas el tipo de beneficiado, el método de extracción y la temperatura empleada durante la preparación de la bebida. Considerando lo anterior, los cambios en algunas de estas variables, incluso en etapas previas al consumo del café en taza, pueden tener un impacto directo en el contenido de compuestos no volátiles.

En este contexto, técnicas analíticas como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), considerada como un método convencional, y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), como método emergente, pueden emplearse para identificar compuestos no volátiles en extractos de café de especialidad. Su aplicación permite explorar la eficacia de ambas técnicas para determinar diferencias químicas en café preparado mediante distintos métodos y temperaturas de extracción, utilizando granos que han sido sometidos a diferentes procesos de beneficiado.

Con base en lo anterior, se plantearon los siguientes objetivos para este proyecto:

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la concentración de compuestos no volátiles en extractos de café de especialidad extraídos por diferentes métodos filtrados y diferenciarlos a través de técnicas de análisis quimiométrico.

Objetivos específicos

1. Estandarizar una técnica de preparación de café que posibilite el control de todas las condiciones de extracción empleando como métodos filtrados Kalita Wave y V60.
2. Implementar el uso de HPLC para la identificación de compuestos no volátiles importantes en extractos de café de especialidad preparados con distintos métodos.
3. Ejecutar un análisis FTIR como técnica rápida de análisis para definir compuestos presentes en extractos de café de especialidad que han sido preparados por métodos de extracción con filtro.
4. Correlacionar y comparar los resultados obtenidos de los compuestos encontrados en extractos de café por ambas técnicas de análisis.

HIPÓTESIS

Las variables que involucran al método de extracción, temperatura de extracción y beneficiado de los granos de café afectan el contenido de compuestos no volátiles como cafeína, trigonelina y ácido clorogénico presentes en extractos de café de especialidad, los cuales pueden ser identificados por una técnica cromatográfica HPLC y una técnica emergente FTIR.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Aspectos botánicos del café

El origen de la planta de café es autóctono de regiones africanas, donde se tiene registro de las primeras especies. Actualmente, con la expansión del cultivo, se han desarrollado nuevas variedades en distintas partes del mundo, especialmente en la franja comprendida entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, conocida como el cinturón del café (Centro de Comercio Internacional, 2022).

En términos botánicos, las plantas productoras de granos de café pertenecen al grupo de las angiospermas, es decir, plantas con flores y frutos con semillas (Farah & Dos Santos, 2015). Estas, a su vez, forman parte de la familia Rubiaceae y son comúnmente conocidas como cafetos o árboles de café. El género *Coffea*, al que pertenecen la mayoría de las especies cultivadas, incluye más de 100 especies identificadas (Ferreira et al., 2019), mientras que el género *Psilanthus*, menos común, se distingue principalmente por la morfología de sus flores.

Los cafetos pueden variar desde pequeños arbustos perennes hasta árboles de madera dura (Mudgil et al., 2018). El desarrollo completo de un cafeto, desde la germinación hasta la producción de los primeros frutos, puede tardar aproximadamente tres años (Rodrigues et al., 2013). Durante este proceso, la planta genera flores blancas, fragantes, similares al jazmín, que al desprenderse dan origen a las cerezas de café, las cuales maduran con el tiempo. Las características morfológicas de los cafetos varían según la especie y la variedad. Por ejemplo, en *Coffea arabica*, las hojas pueden presentar tonalidades distintas dependiendo de la variedad: en *Bourbon* son de color verde claro, mientras que en *Typica* pueden adquirir un tono bronce.

Desde el punto de vista agronómico, la vida útil productiva de un cafeto no suele superar los treinta años. Las primeras flores aparecen entre los tres y cuatro años después de la germinación, y marcan el inicio del ciclo de fructificación (Rodrigues et al., 2013). Tanto el crecimiento como el desarrollo del cafeto están influenciados por diversos factores, incluyendo la especie, la variedad y las condiciones ambientales como altitud y exposición solar (Ferreira et al., 2019). Estos

factores no solo afectan el desarrollo de la planta, sino también la calidad del grano. Por ejemplo, una menor exposición solar se ha asociado con un mayor tamaño del grano y un mayor contenido de lípidos (Li, 2022), mientras que las condiciones climáticas influyen en la presencia de compuestos orgánicos volátiles en los granos verdes (Bastian et al., 2021).

Factores como la latitud, la altitud y las características del suelo influyen de manera significativa en la calidad del café. Los cafetos pueden crecer en una amplia variedad de suelos, siempre que estos presenten una buena porosidad, profundidad adecuada y un contenido óptimo de materia orgánica. Incluso los suelos de origen volcánico han demostrado ser favorables para el desarrollo de estas plantas (Lambot et al., 2017). La latitud puede incidir en el tamaño de los granos, mientras que la altitud está estrechamente relacionada con atributos sensoriales como la acidez y el aroma del café (Centro de Comercio Internacional, 2022).

Actualmente, se han originado diversas especies de café en distintas regiones del mundo. La diversidad es tal, que no ha sido posible clasificarlas en su totalidad. Las diferencias en los métodos de cultivo, así como las condiciones climáticas y edáficas particulares de cada región, han contribuido a la generación y adaptación de nuevas especies y variedades.

1.2 Estructura de la cereza

El fruto del cafeto se clasifica botánicamente como una drupa, comúnmente conocida como cereza de café. Las condiciones óptimas para su cosecha, con el fin de obtener granos de alta calidad, se alcanzan cuando el fruto presenta un tono rojo brillante y una textura firme (Das, 2021). El tiempo requerido desde la floración hasta la maduración completa del fruto varía según la especie, el sistema de cultivo y las condiciones climáticas. En promedio, este proceso toma alrededor de 220 días para *Coffea arabica* y aproximadamente 300 días para *Coffea canephora* (Ferreira et al., 2019).

Cada cereza de café está compuesta por cinco capas estructurales, al igual que otros frutos. La capa externa se denomina piel (epicarpio o exocarpio), cuya

función es proteger al fruto y cuyo color varía —rojo, rosa intenso o amarillo— según el grado de maduración (Das, 2021). Le sigue el mesocarpio, que corresponde a la pulpa, y una tercera capa viscosa llamada mucílago, rica en azúcares, sacarosa y agua (Bastian et al., 2021). Posteriormente se encuentra el endocarpio, también conocido como pergamino, que consiste en una fina capa de polisacáridos. Finalmente, la capa más interna es la piel plateada (o tegumento seminal), compuesta mayoritariamente por polisacáridos, proteínas y polifenoles, la cual recubre directamente a las semillas.

Generalmente, cada cereza contiene dos semillas, comúnmente denominadas granos de café, con un tamaño promedio de 8 a 10 mm de largo y 6.5 a 9.5 mm de ancho (Mudgil et al., 2018). La madurez del fruto influye significativamente en la calidad sensorial de la bebida. Durante el proceso de maduración, la cereza experimenta una serie de cambios químicos y de color: el paso de verde a amarillo se debe principalmente a la acumulación de carotenoides y flavonoides, mientras que la transición de amarillo a rojo se atribuye a la presencia de antocianinas. Asimismo, se presentan variaciones en la composición química, como en los niveles de ácidos málico, oxálico, cítrico y quínico (Bastian et al., 2021).

1.2 Especies de café

Aun cuando existe amplia variedad de especies que pertenecen a la familia Rubiaceae, las especies de café principales y las más consumidas y comerciales son Arábica (*Coffea arabica*) y Robusta (*Coffea canephora*), ambas con un origen en la región de África central (Cohen, 2021). Arábica y robusta son las especies más reconocidas y cada una tiene variedades de café con características muy diferentes entre una y otra a pesar de pertenecer a la misma especie. Estas variantes han sido desarrolladas, en algunos casos, para mejorar la genética de la planta y hacerla más resistente, lo que es un hecho es que para la especie Robusta las variedades son mucho menores que para Arábica. Algunas de las subespecies más conocidas provenientes de la especie arábica son *Typica* y *Bourbon* con orígenes en las culturas de Yemen (Herrera & Lambot, 2017). Entre ellas existen diferencias muy marcadas como los perfiles en taza, el rendimiento o la facilidad de cultivo. Se

reconoce que existen más de 50 variedades de café que provienen de la especie arábica (Cohen, 2021). A pesar de que ambas son las especies más comercializadas en el mundo, la especie arábica cobra mayor relevancia por ser considerada para cafés de tipo gourmet o de especialidad debido a su gran calidad en cuanto a sabores y aromas suaves en taza a diferencia de la especie robusta que presenta sabores más fuertes. También ambas especies difieren en el contenido de cafeína siendo robusta la de niveles más altos.

1.3.1 Coffea arábica

Esta especie es la más representativa y se dice que su origen se ubica en Etiopía, aunque también se ha identificado su evolución en la frontera de Kenia y Sudán donde se aún se produce de forma silvestre (Morris, 2019) un porcentaje aproximado de entre el 70 y 75% del café cultivado mundialmente pertenece a esta especie la cual se caracteriza por ser de más alta calidad sensorial gracias a sus propiedades organolépticas como sus aromas y sabores considerados como afrutados, florales y suaves (Cohen, 2021), estos han permitido que sea el más comercializado y del que más variedades existen, se cultiva en más de 80 países y abarca millones de hectáreas en las zonas tropicales de todo el mundo (Melese & Kolech, 2021). Las temperaturas medias son óptimas para el crecimiento de la planta de la especie arábica que van desde los 18 hasta los 22°C, además de que tienden a crecer en tierras altas (Ferreira et al., 2019)

Diferentes estudios han señalado que la diversidad genética de esta especie es más baja en comparación con la especie robusta, es por esto por lo que su resistencia a plagas es deficiente (Enríquez et al., 2020) y suele ser más difícil de cultivar. Los árboles pertenecientes a esta especie suelen medir alrededor de 6 m y crecen bajo temperaturas moderadas en altitudes grandes (Das, 2021); los granos tienen la característica de tener forma ovalada con un tamaño aproximado de 7 mm a 12 mm (Centro de Comercio Internacional, 2022). La desventaja que presenta la especie es la delicadeza con la que se debe tratar la planta y tratamiento que

requiere por todos los cuidados en cuanto a estrés derivados de los cambios climáticos o plagas que pueden afectar la calidad del café.

Para arábica las dos variedades más comerciales y conocidas son *Bourbon* y *Typica*, siendo la variedad *Bourbon* la de mejor calidad en taza. Según datos históricos la variedad *Typica* se originó de una planta de café que fue trasladada de Yemen a India y por su parte el origen de la variedad *Bourbon* se dio con la introducción de árboles de café provenientes también de una ciudad de Yemen hacia la Isla Bourbon (Ferreira et al., 2019). A partir de estas dos variedades también algunas mutaciones que dan origen a otro tipo de variedades como *Caturra*, *Catuai*, *Blue Mountain*, *Geisha*, entre otras.

1.3.2 Especie robusta

El origen de esta especie es más reciente que la arábica y se considera como procedente de la República Democrática del Congo. Representa solo de un 25 a 30% del café producido a nivel mundial y su denominación se atribuyó a la resistencia de la planta contra plagas o enfermedades, y su facilidad de cultivo (Cohen, 2021), gracias a esto es por lo que su producción es más barata. Al contrario de arábica, la especie robusta puede soportar temperaturas más altas y puede desarrollarse en tierras más bajas (Ferreira et al., 2019) lo que quiere decir que es más adaptable a los cambios climáticos. Esta especie también se derivó en variedades en menor medida que para arábica, sin embargo, las de mayor propagación a nivel mundial son: *Canephora de Guinea* y *Canephora del Congo*

Los arbustos presentan una altura aproximada de 10 m y suelen crecer en altitudes bajas con climas cálidos (Das, 2021) ; sus granos se caracterizan por ser redondos con tamaños desde los 5 mm a los 8 mm. Sin embargo, de ella se obtienen frutos de menor calidad sensorial porque presentan sabores más fuertes y texturas más ásperas, se dice que los mayores compradores de esta especie son aquellos dedicados a la fabricación de productos que contienen cafeína (Centro de Comercio Internacional, 2022) debido a que contiene aproximadamente el doble de cafeína que la especie arábica además de que es muy utilizado en cafés comerciales de consumo cotidiano.

1.3 Producción Internacional, nacional y regional de café

Se dice que el café es el producto más comercializado en todo el mundo, solo por debajo del petróleo. El café de las diferentes regiones del mundo donde se cultiva posee características diferentes tanto en sus componentes químicos como en sus propiedades sensoriales, estas características dependen de muchos factores y uno de ellos es su origen geográfico, algunos países son muy reconocidos por el desarrollo de sus especies que son de buena calidad. La producción varía a nivel mundial, nacional e incluso dentro de una misma región; sin embargo, como producto agrícola la producción suele ser bastante consistente.

De acuerdo con Cohen (2021), la producción mundial de café entre el periodo 2019-2020 fue de aproximadamente 171 millones de sacos. Considerando que el peso estándar de un saco es de 60 kg, la producción total de café en ese periodo ascendió a 10,260,000 Ton.

A nivel global, los principales productores de café son Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia, Etiopía, Uganda, Honduras, India, Perú y México, este último en la décima posición (Aswathi & Murthy, 2024). En México, la producción de café representa una fuente esencial de ingresos para productores regionales, quienes en su mayoría continúan empleando técnicas manuales. Aun así, el café mexicano constituye un importante producto de exportación, principalmente hacia Estados Unidos, quien es su mayor consumidor, así como a mercados relevantes como Canadá y Japón (SAGARPA, 2017). El territorio nacional, gracias a su amplia diversidad de climas y suelos, permite obtener distintos perfiles de café con características sensoriales únicas (Cohen, 2021); en este sentido, el café mexicano se distingue por su dulzura natural y ligereza (Egger et al., 2015). Una de las variedades más reconocidas es el café *Pluma*, originario de Pluma Hidalgo, Oaxaca, el cual cuenta con denominación de origen.

En el cierre preliminar de 2022 se reportó una producción nacional de 987,102 toneladas de café, siendo Chiapas y Veracruz los principales estados productores, mientras que Puebla ocupó el tercer lugar con una participación del 17.4%, equivalente a 171,700 ton (SIAP, 2022). Para 2024, la producción nacional de café cereza alcanzó 1,056,306 ton, lo que representa un incremento sustancial

(+7%) en comparación con 2022. Los tres estados con mayor producción continuaron siendo Chiapas, Veracruz y Puebla, este último con una participación incrementada hasta el 21.6%. En conjunto, estas tres entidades aportaron el 83.1% de la producción nacional. En el caso de Puebla, los municipios con mayor superficie cultivada y valor de producción fueron Xicotepec, Zihuateutla y Cuetzalan del Progreso (SIAP, 2024).

1.4 Beneficiado de café

Una vez que los frutos han sido cosechados, se seleccionan los de mejor apariencia en color, tamaño, y sin defectos para darle paso a lo que se conoce como beneficiado. Es aquí donde los frutos se someten a un procesamiento para llegar a la semilla de la cereza retirando todas sus capas, esta semilla es lo que conocemos como grano de café verde y cada cereza puede contener uno o dos los cuales también se clasifican ya secos de acuerdo con su tamaño separando los que se consideran como defectuosos. Este es uno de los procesos más importantes en el café porque repercute directamente tanto en las propiedades sensoriales del café ya preparado como en sus propiedades fisicoquímicas y su composición química.

Los métodos húmedo y seco constituyen las formas más básicas de beneficiado del café, mediante las cuales se obtiene el grano verde y constituyen los extremos del espectro de producción. No obstante, en la actualidad existen variaciones y se continúa experimentando con esta etapa del proceso con el fin de generar nuevas notas de sabor y aroma. Estas variaciones han dado lugar a métodos alternativos como el *honey* (en niveles que van del amarillo al negro), el *despulpado* (también denominado *pulped natural*) y el *semilavado*, en los cuales el grano se mantiene en reposo con cierta cantidad de mucílago. Dicho manejo permite conservar una humedad óptima durante el secado y, al mismo tiempo, evita el crecimiento microbiano en los granos (Sanz-Urbe et al., 2017). A nivel mundial, cerca del 80% del café es producido por pequeños agricultores (Browning, 2019), muchos de ellos ubicados en países en vías de desarrollo, donde las técnicas de producción suelen llevarse a cabo de forma artesanal, utilizando principalmente recursos naturales como la energía solar para el secado.

1.5.1 Método seco o natural

Este método es de los primeros que se utilizaron para procesar los frutos; el café en taza preparado a partir de granos procesados bajo este método satisface el gusto de personas que prefieren sabores más dulces ya que consiste en el secado de lotes de frutos maduros de forma íntegra (con piel, pulpa y mucílago) con el fin de obtener cafés naturales y por lo tanto se desarrollan notas dulces gracias a que se mantuvo el fruto completo recubriendo al grano hasta su secado completo. El objetivo en este proceso es seleccionar los frutos de mayor densidad y ejecutar de forma correcta el secado (de Sousa e Silva et al., 2021). Generalmente los lotes de frutos son secados de forma manual mediante la exposición al sol en camas africanas, las cuales son estructuras elevadas, generalmente fabricadas con madera o metal y cubiertas con una malla o tela de alambre, sobre las que se colocan las cerezas de café para que se sequen de manera uniforme, proceso que puede tardar hasta dos semanas, aunque se reduce sensiblemente cuando se emplean secadores de aire mecánicos; en ambos casos, el objetivo es lograr que el café alcance una humedad residual del 10 a 12% (de Melo Pereira et al., 2019). Una vez seco el fruto se retiran todas las capas para quedarse finalmente con el grano listo para trillarse. El beneficiado natural fue muy utilizado cuando aún no se tenían las máquinas despulpadoras usadas para lavar los frutos en el método húmedo o en climas muy cálidos donde se carecía de fuentes de agua corriente. Este método se utiliza para obtener cafés de buena calidad que suelen ser muy apreciados en el mercado, por sus sabores dulces y suaves, baja acidez y cuerpo pesado en taza (Sanz-Urbe et al., 2017).

La desventaja en este beneficiado es la falta de control en algunas de las variables que pueden llegar a un deterioro de la cereza de café o a la aparición de microorganismos u hongos como el moho por la exposición a la intemperie mientras está secándose, además también podría ocurrir una fermentación la cual afectaría mucho la calidad sensorial de la bebida ya preparada (Aswathi et al., 2023), por lo que no es recomendable en zonas donde llueve mucho o demasiado húmedas (Halagarda & Obrok, 2023).

1.5.2 Método húmedo o lavado

El beneficiado húmedo es uno de los métodos más utilizados en el procesamiento de las cerezas de café. Se trata de un proceso más sofisticado que el natural, cuyo resultado es una bebida de mayor calidad (Das, 2021). Este método se emplea principalmente en países de Centro y Sudamérica (Cohen, 2021) y consiste, en términos generales, en despulpar los frutos mediante una máquina despulpadora, lo que deja al grano recubierto por una fina capa de mucílago. Posteriormente, los granos se trasladan a tanques de fermentación con agua, donde reposan durante un tiempo determinado, en el cual ocurre una fermentación corta que elimina por completo el mucílago (Cohen, 2021). Tras este paso, los granos son lavados para retirar los residuos de la fermentación y, finalmente, se secan ya sea al sol o con la ayuda de secadores mecánicos. Es con este método principalmente donde se presentan más variaciones que repercuten sensorialmente en el café, estas variaciones pueden tener relación con las variables del proceso, no obstante, el punto en común entre estas variaciones es el proceso de secado de los granos, el cual se realiza sin las capas de la cereza que van desde la piel al mucílago. Tradicionalmente, el mucílago es removido a través de procesos largos de fermentación para después lavar los granos y finalmente proceder con el secado, sin embargo, se ha ido experimentando con este método hasta llegar a variaciones a partir de la remoción del mucílago teniendo dos alternativas de condiciones de fermentación que consisten en adicionar u omitir agua. Ambas condiciones tienen efectos en cuanto sabor, por ello se puede notar que cuando la fermentación se llevó a cabo adicionándole agua hay un énfasis en la acidez, además de que se elimina astringencia (Sanz-Urbe et al., 2017).

Una desventaja adicional del método lavado es la gran cantidad de agua que se requiere para poder limpiar los granos que podría incurrir en la escasez de este recurso; adicionalmente es la posible que se presente una sobre fermentación si no se lleva un control adecuado del proceso, lo que afecta directamente en sus propiedades sensoriales.

1.5.3 Honey

La experimentación con los procesos de beneficiado propició el desarrollo de nuevas técnicas, de las cuales en la actualidad son muy utilizadas. Una variación muy reconocida se le conoce como método *honey*, en ocasiones también llamado *pulped natural*, aunque existen variaciones locales entre ambos; por lo regular, el método *honey*, como un intermedio entre lavado y natural, se desarrolló en Costa Rica y se emplea con regularidad en Centroamérica y regiones de México; por su parte, el *pulped natural* se considera un método originario de Brasil, donde se emplea extensivamente; también es un método popular en el sureste asiático.

A pesar de lo que pudiese sugerir su nombre, la denominación *honey* no tiene ninguna relación a su sabor u olor a miel sino más bien a la textura enmielada que presenta por el mucílago que se deja para recubrir al grano; por lo tanto, este método consiste en retirar la piel y gran parte de la pulpa dejando una parte de mucílago en el grano y secarlo (Cohen, 2021). Se dice que el beneficiado *honey* es una variación del método seco, ya que el grano es secado con una parte de mucílago, pero a la vez considera el método húmedo porque puede ocurrir una fermentación limitada gracias a ello; por ello, más bien puede considerarse como un método intermedio(semiseco) entre ambos tipos de beneficiado.

El beneficiado *honey* es un método también considerado como semiseco que puede variar en coloración entre amarillo, rojo o negro dependiendo del porcentaje de mucilago retenido tras el despulpado, lo que también tiene repercusión en sus propiedades físicas y químicas ya que al dejar una capa más fina de mucilago se secará prontamente a diferencia de una capa más gruesa. Para un *honey* amarillo el porcentaje de mucilago retenido es de aproximadamente 25%, es por esto por lo que tiene más similitud a un café lavado y esto le proporciona un suave dulzor. Para un *honey* rojo el mucilago retenido es del 50% lo que le da dulzor, pero también notas almibaradas en boca. Para un *honey* negro se retiene un 100% del mucilago lo que le da un dulzor mayor y notas afrutadas más acentuadas lo que se asemeja a un café natural (Aswathi & Murthy, 2024). Algunos productores reconocen la existencia de otras coloraciones producto de este tipo de beneficiado (blanco, dorado, morado) aunque son menos comunes.

El auge de este beneficiado ha sido grande, y ante el incremento del consumo de café de especialidad, que es café de alta calidad, es de los más usados para procesarlo y son de los que más se encuentran en las barras de especialidad.

1.6 Grano verde

La última etapa del beneficiado, tanto en el método húmedo como en el seco, es el trillado, en el cual se retira el pergamino, la penúltima capa que recubre al grano, para obtener el café verde listo para el proceso de tostado. El café en verde es una de las formas más comunes de comercialización debido a las ventajas que ofrece, como un mayor tiempo de almacenamiento.

En cuanto a su composición química, los granos verdes contienen polisacáridos, lípidos, polifenoles, alcaloides, vitaminas y minerales (Şemen et al., 2017), además de carbohidratos, ácidos orgánicos y agua (Poisson et al., 2017). Estos compuestos son determinantes en la calidad de la bebida en taza, pues actúan como precursores de los compuestos responsables del aroma y el sabor durante el tostado. Dentro de ellos, el ácido clorogénico es uno de los más abundantes y relevantes, acompañado por la cafeína, la trigonelina y diversos azúcares (Poisson et al., 2017).

El café verde también ha despertado interés por sus posibles beneficios para la salud, principalmente cuando se consume en extractos o suplementos, ya que se ha asociado con la reducción del peso corporal y del índice de masa corporal (Asbaghi et al., 2020). En este sentido, se considera un alimento funcional en desarrollo (Sanlier et al., 2019), y ha sido catalogado en la Unión Europea como un alimento novedoso, dado que tradicionalmente el café se consume en su forma tostada (Klingel et al., 2020).

Para su comercialización, el café verde es sometido a pruebas sensoriales (aspecto y aroma), además de evaluaciones de humedad y actividad acuosa (Centro de Comercio Internacional, 2022). Finalmente, se almacena en sacos que generalmente son de yute (aunque también pueden ser de otros materiales), quedando listo para su transporte.

1.7 Tostado del café

El tostado es el proceso culminante en donde los granos definen sus propiedades físicas y químicas finales, dependiendo de las condiciones de temperatura y tiempo en las que son procesados. Es en esta etapa donde se producen más cambios en el grano tanto visibles (color, textura, tamaño) como de reducción de masa por la pérdida de humedad, y el aumento de volumen (Pereira et al., 2021). Se puede considerar que el tostado es un tratamiento térmico seco que tradicionalmente se hace a partir de aire caliente que le da al grano otro color y consistencia (Schenker & Rothgeb, 2017). Adicionalmente, es aquí donde se desarrollan las reacciones químicas que proporcionan al grano su perfil de aroma y sabor y que pueden eventualmente ser percibidos en taza.

El control de la temperatura y el tiempo de tueste es fundamental para que las reacciones químicas más importantes ocurran dentro de los granos sin quemarlos. En general el rango de temperatura de tueste va desde los 200 hasta los 250°C en un tiempo aproximado de 3 a 20 minutos (Schenker & Rothgeb, 2017).

Los cambios dentro y fuera del grano son bastante notorios; los granos tostados pierden dureza y se vuelven más frágiles (Das, 2021). Por otro lado, su composición química también se modifica debido a que el aumento de temperatura provoca tanto reacciones pirolíticas como procesos de pardeamiento no enzimático. Entre las reacciones pirolíticas destacan la degradación térmica de polisacáridos, lípidos y proteínas, que generan compuestos volátiles, gases y fragmentos carbonizados. Paralelamente, el calor impulsa reacciones de pardeamiento no enzimático, principalmente la caramelización de azúcares y la reacción de Maillard entre azúcares reductores y aminoácidos, en la que se incluye la degradación de Strecker, responsable de la formación de aldehídos y compuestos heterocíclicos que enriquecen el perfil aromático. Estos procesos conducen a la generación de melanoidinas y al desarrollo del característico color marrón, de manera que las reacciones pirolíticas aportan notas características a tostado y carbonizado, mientras que las de pardeamiento no enzimático contribuyen a la complejidad sensorial y al color característico del café.

En la actualidad, con el desarrollo de nuevas tecnologías se implementan varios métodos de tostado, algunos de ellos mediante conducción o fuego directo, en lechos fluidizados, o con aire caliente. Las personas que se dedican al tostado de los granos se les conoce como maestros tostadores y son quienes se encargan del tiempo estimado de tostado según el término deseado (Pereira et al., 2021).

1.7.1 Proceso de tueste

En la primera etapa del tueste ocurre un secado para eliminar el agua contenida en el grano, esto ocurre antes de que la temperatura alcance los 150°C pero no se elimina por completo debido a que la temperatura de ebullición del agua aumenta por la presión interna en el grano (Fernandes, 2019), además si el contenido de agua disminuye excesivamente también podría detener algunas reacciones que requieren de la presencia del agua en el grano (Pereira et al., 2021) a esta etapa también se le considera como endotérmica, ya que los granos están absorbiendo el calor para darle paso a todas las reacciones químicas.

Mientras transcurre el tueste ocurre el primer cambio de color de verde a amarillo de los granos y también empiezan a expandirse, el color de los granos comienza a ser más oscuro y las primeras reacciones que ocurren son las de Maillard y la caramelización de azúcares como la sacarosa alrededor de los 160°C (Fernandes, 2019), estos azúcares reaccionan con aminoácidos para generar melanoidinas que son las encargadas del color y aromas (Cohen, 2021).

Durante el proceso de tueste, los granos experimentan cambios continuos de color que son cuidadosamente monitoreados por los maestros tostadores, quienes buscan cumplir con la curva de tueste sin que los granos lleguen a quemarse. Esta curva corresponde a un gráfico de la evolución de la temperatura a lo largo del tueste, el cual constituye una herramienta clave para controlar y ajustar el proceso, en especial en momentos críticos como el primer *crack*. Este es el sonido generado por los granos al tostarse (similar al de una palomita de maíz al reventarse) debido al desarrollo de las reacciones químicas como pirolisis y degradación de Strecker que liberan gases como CO₂, lo que provoca una ruptura dentro del grano y por lo tanto una expansión.

El diseño de la curva permite desarrollar perfiles específicos de sabor y aroma, por lo que no existe una única forma de aplicarla: cada curva puede personalizarse en función del origen del café, sus características intrínsecas y los atributos sensoriales deseados en el producto final. Puede ocurrir un segundo *crack*, pero este es menos intenso y solo se presenta en aquellos procesos donde se pretende que el tostado sea más intenso. El proceso termina dejando enfriar los granos para después ser destinados a su consumidor final.

1.7.2 Niveles de tostado

Según Cohen (2021) no existen reglas para un tostado preciso ni un estándar exacto para denominar un tueste como claro, medio u oscuro ya que no todos siguen un mismo patrón, pero de acuerdo con diferentes niveles de tueste se pueden incluir en alguno de los tres grupos principales.

1.7.2.1 Tuestes ligeros

El tueste ligero se logra solo hasta poco después del primer crack y la temperatura dentro del grano puede alcanzar una temperatura entre 180 hasta los 205°C, además de que no se observa presencia de aceites debido al poco tiempo de tueste (Rusinek et al., 2024). Los tuestes ligeros incluyen granos con tonos marrón claro y brindan en un café preparado un cuerpo ligero, además de que se acentúa su acidez, pero también destaca su dulzura y frutalidad. Algunos de los tuestes considerados como ligeros en orden de grado de tueste son denominados *Light City*, *Half City* y *Cinnamon* (Cohen, 2021).

1.7.2.2 Tuestes medios

Para un tueste medio los granos presentan un color marrón medio y su sabor en taza es más fuerte con un cuerpo no tan ligero y una acidez más baja que en los tostados ligeros, la superficie de los granos no es grasosa (Rusinek et al., 2024) siendo considerado como equilibrado porque presenta características de sabor y cuerpo. Algunas variedades para un tostado medio son: *City*, *American* y *Breakfast* (Cohen, 2021)

1.7.2.3 Tuestes oscuros

Los granos tostados bajo este esquema se obtienen llegando a temperaturas mucho más altas que van desde los 220 hasta los 240°C (Rusinek et al., 2024), su principal característica es un color más oscuro que en los anteriores tuestes y una superficie aceitosa debido a la liberación de los aceites dentro del grano, destacando sabores más amargos y son considerados como cuerpos más pesados; en este nivel de tueste la acidez es casi imperceptible. Los tostados oscuros más reconocidos son: *High*, *Continental*, *Espresso*, *Italian*, *French*, entre otros

1.8 Reacciones Químicas durante el tostado

El tueste es un proceso de transformación completa del grano, tanto física como química y durante este procedimiento se llevan a cabo reacciones más importantes que son la clave en los aspectos sensoriales de un café en taza. Como se mencionó anteriormente, el café tostado tiene una gran cantidad de compuestos derivados de estas reacciones dentro de las más importantes son: la reacción de Maillard, la degradación de Strecker, la caramelización de azúcares y la pirolisis.

La primera que ocurre es la reacción de Maillard que es una de las principales que intervienen en el aroma característico del café y en la formación de diferentes compuestos no volátiles como pirazinas, pirroles, piridinas, furanos, tioles, etc. (Cardoso et al., 2023) estos compuestos son formados debido a la reacción entre aminoácidos y azúcares reductores en el proceso térmico del grano durante el tueste. A esta reacción se le atribuyen cambios en el color debido a la formación de melanoidinas y también destaca su influencia en la capacidad antioxidante del café. Otro de los fenómenos que también produce melanoidinas dentro del grano es la caramelización de azúcares, por tanto, contribuye también en el color de los granos, en este proceso los azúcares se degradan debido a la temperatura hasta caramelizarse así que brindan cierto dulzor.

La degradación de Strecker también influye en el aroma del café ya que es responsable de la reacción de los aminoácidos para convertirlos en aldehídos mediante su desaminación y descarboxilación oxidativa proporcionando notas

maltosas y florales (Poisson et al., 2020). En la pirolisis ocurre la descomposición de compuestos orgánicos del grano por acción de la temperatura, como la sacarosa, generando compuestos como furanos, ácidos carboxílicos y aldehídos (Wei & Tanokura, 2015), es por esto por lo que es importante para el aroma y sabor del café, en esta reacción se desprende vapor y dióxido de carbono (Pereira et al., 2021).

La presencia de ácido clorogénico en el grano verde es bastante abundante, y como se mencionó anteriormente es uno de los mayores precursores de aromas y sabores en el café ya tostado. Dentro de los ácidos clorogénicos más abundantes en los granos de café se encuentran los cafeoilquínicos y dicafeoilquínicos (Liang et al., 2016). Durante el tueste estos ácidos clorogénicos disminuyen debido a su degradación en ácido quínico y cafeico, lo cual está asociado a la intensidad del proceso (Wei & Tanokura, 2015) dando origen a distintos compuestos volátiles.

Otro de los mayores precursores de aroma y sabor presente en los granos de café es la trigonelina que también sufre cambios durante el tueste; en esencia, se ha reportado que ocurre una degradación a ácido nicotínico (Wei & Tanokura, 2015). Por su parte, la cafeína que no sufre alteraciones por el efecto de la temperatura ya que es termoestable y no cambia incluso si el grano sufre un sobre tostado (Cwиковá et al., 2022) .

1.9 Café de especialidad

Siendo el café la bebida más consumida en el mundo después del agua, resulta evidente su importancia como parte esencial de la vida diaria de millones de personas. Esta relevancia impulsa la necesidad de satisfacer las preferencias de los consumidores, lo que a su vez ha motivado la experimentación y la innovación en las distintas etapas del procesamiento del grano, desde su cultivo y beneficio hasta el tostado y la preparación final.

En la actualidad existe una gran variedad de marcas de café soluble en el mercado, pero la calidad de estos cafés generalmente es baja. Con el desarrollo de la primera ola del café al final del siglo XIX que comprende desde los inicios de su consumo en donde la calidad no era vista como algo necesario y únicamente era

reconocida por los efectos de la cafeína (Campos et al., 2021), en las décadas de 1980 – 1990 y con la apertura de cafeterías como Starbucks en EUA o Juan Valdez en Colombia (de Vasconcelos Teixeira, 2020) que dieron un mayor impulso al consumo de café incrementando su calidad y siendo reconocidas por sus atributos sensoriales se caracterizó la segunda ola. La especial atención en aspectos del café como su origen y los procesos a los que fue sometido, introdujo cafés de mejor calidad hasta llegar a la tercera ola que es la actual y que se caracteriza justamente por el consumo de cafés especiales centrándose en más aspectos como su acidez o cuerpo en taza.

El término de café de especialidad fue introducido por primera vez por Erna Knutson quien fuera una de las grandes impulsoras del café de especialidad y fundadora de la Asociación Americana del café de especialidad (Cohen, 2021). Este tipo de café se considera de alta calidad debido a que sigue una trazabilidad bien definida en todos los puntos de su producción, desde la planta hasta la preparación de la bebida, para dar como resultado un café en taza con muy pocos o cero defectos. Su valor agregado que tiene un café de especialidad es que los consumidores tienen el acceso a información importante de los granos como su origen (país, ciudad, región, nombre de la finca), algunas condiciones climáticas y geográficas donde creció la planta, el nombre del productor, el lote y las posibles notas de sabor y olor características que se pueden percibir en taza. La Asociación de Cafés de Especialidad (SCA por sus siglas en inglés), define al café de especialidad como aquel que ha sido evaluado por catadores certificados (*Q graders*) y que ha obtenido un puntaje mayor a 80 en la escala de esta asociación; para que un café se considere de especialidad debe estar libre de defectos primarios, con defectos secundarios limitados

El proceso de producción de café de especialidad al ser sumamente cuidadoso en todos sus aspectos repercute en el precio de compra y venta, es por esto por lo que ofrece mayores oportunidades de ingreso a los productores de vender su café a precios justos ya que no suelen ser bien retribuidos por las grandes cadenas comerciales que compran su café para diferentes productos, pero a precios bastante bajos.

1.10 Métodos de extracción

En la actualidad existen muchos métodos que permiten la extracción de los granos molidos de café para preparar la bebida, estos métodos han ido evolucionando con el paso del tiempo, usando diferentes condiciones como la presión o la gravedad y también se han innovado otros métodos como es el caso del *cold brew* en donde no se necesita agua caliente.

La parte culminante de todo el proceso de elaboración de café antes de ser consumido es su preparación y esta etapa no es más que un fenómeno físico en donde se produce una extracción sólido-líquido, la cual influye enormemente en el resultado final de un café preparado. Para obtener un buen resultado, se toman en cuenta parámetros muy importantes en la preparación como el método, tiempo de extracción, temperatura y tipo del agua, el grado de molienda de los granos (que influye en el área de contacto entre el agua/grano) e incluso la turbulencia con menor impacto (Cordoba et al., 2020).

Los métodos de extracción se llevan a cabo en equipos específicos bajo condiciones de extracción diferentes de los cuales se obtendrán resultados bastante variables, de acuerdo con Lee, (2021) existen cuatro categorías generales para diferenciar los métodos de extracción y son: filtración o goteo, inmersión, decocción y presión.

Los métodos de extracción por filtración o goteo utilizan un medio filtrante de diferentes materiales por la que el agua pasa a través de la cama del café para extraer todos los compuestos, aromas y sabores del café algunos ejemplos de este tipo de métodos son: Chemex, V60, Kalita, etc.

Los métodos que funcionan por inmersión, como su nombre lo dice, extraen el café a través de una inmersión de café molido en agua por un tiempo, la temperatura del agua puede ser caliente y se puede preparar en una prensa francesa que es el método más común o en su defecto para preparar *cold brew* también se utiliza una inmersión y el equipo más conocido para prepararlo se le denomina Toddy.

La forma de funcionamiento en los métodos de decocción consiste en que agua y café son mezclados y puestos a calentar en conjunto hasta llegar a la temperatura de ebullición del agua y de esta forma conseguir el extracto con todas las propiedades del café, la cafetera Moka es uno de los métodos más antiguos y son el ejemplo perfecto de esta categoría; finalmente se encuentran los métodos que usan agua a presión para extraer el café tal como funcionan las máquinas de espresso o un Aeropress.

Otra de las clasificaciones entre los métodos de extracción existentes se refiere al uso de filtros y la diferencia más destacada es la remoción de diterpenos. Por diversos estudios se sabe que los diterpenos pueden elevar los niveles de colesterol LDL en la sangre por lo que genera un punto negativo en el consumo de café. Esta condición se presenta en cafés que no han sido filtrados o aquellos que usan un filtro de metal (los filtros de metal no retienen diterpenos) (Gil Roales-Nieto et al., 2019). Se dice que un café que no ha sido filtrado presenta una mayor cantidad de diterpenos que aquellos que si han sido filtrados incluso por delgadas paredes de filtro de papel.

Una taza de café que ha sido preparada con un método que usa algún filtro (Kalita, V60, Origami o Chemex) es completamente diferente a aquella que ha sido preparada con un método sin filtración (Aeropress, Prensa francesa, Sifón japoses o Moka), estas diferencias están relacionadas principalmente con el cuerpo o la *mouthfeel*, ya que un café preparado con filtro suele tener un cuerpo más suave.

La forma de preparar una taza de café ha ido cambiando y evolucionando hasta tener diversos procedimientos y métodos con los que se puede extraer el café de los granos con el objetivo final de obtener una taza con diferentes características según la preferencia de cada persona.

1.10.1 Métodos de extracción para cafés filtrados

Hay una gran diversidad de métodos de extracción filtrados que utilizan equipos diferentes con formas diferentes, sin embargo, el elemento común de todos estos métodos es el filtro que utilizan de los que hay una gran variedad lo que

conlleve formas diferentes de oxigenar al café a la hora de extraerlo, además de retener sólidos y otros compuestos no deseados.

Independientemente del método filtrado que se desee utilizar, el procedimiento para preparar café generalmente es el mismo y como se ha mencionado anteriormente cada aspecto en la preparación del café puede interferir en el resultado final.

Definido el método y filtro que será utilizado, la primera condición que se debe precisar es la proporción de agua y café lo cual influirá en la concentración de la bebida, las proporciones son variadas pero la SCA recomienda una proporción 1:18 (18 ml de agua por cada gramo de café) para obtener un café equilibrado.

La molienda es un procedimiento importante, que se debe realizar al momento de preparar el café para no perder propiedades sensoriales relevantes para el sabor y aroma. El tamaño de partícula del café determinará la tasa de extracción de muchos de sus compuestos químicos (Cordoba et al., 2020). El grado de molienda del café depende del método, pero para métodos filtrados la molienda óptima generalmente suele ser media para evitar sub o sobre extracciones.

Una vez definidas estas dos condiciones se da paso a realizar la extracción que comienza con el remojo del filtro para evitar alguna transferencia de sabor u aroma del material con el que está hecho y así poder depositar el café molido en él.

Con ayuda de una báscula y un cronómetro comienzan las etapas de la extracción; a la primera etapa se le conoce como *blooming* y no es más que es una preinfusión del café que se realiza con un porcentaje (que generalmente es el doble de los gramos de café molido) de agua caliente a temperaturas de entre los 92 y 96°C, de acuerdo con los criterios de la SCA. En esta etapa el café se humecta y libera el dióxido de carbono dentro de los granos antes de comenzar la extracción de los compuestos solubles. El *blooming* es muy importante ya que si no se libera el CO₂ evita la extracción de los demás componentes debido a que puede repeler el agua (Easto, et al., 2017). Las siguientes etapas corresponden a los vertidos, que consisten en ir vertiendo el agua restante en la cama de café de forma gradual, el número de vertidos pueden ser uno solo o varios vertidos dependiendo las preferencias de cada persona. El proceso de extracción termina al finalizar el último

vertido y que el agua haya bajado casi en su totalidad o incluso hasta que termine el tiempo establecido si es que lo hubo.

1.10.1.1 V60

El origen del V60 se dio en Japón, en una empresa dedicada a la fabricación de vidrio llamada Hario y su creación fue en el año 2004. Esta cafetera consiste en un goteador con una forma cónica en ángulo de 60° y surcos en espiral, caracterizada por la fluidez con la que el agua atraviesa al café (Café infiltrado, 2024), por medio de un filtro que también tiene una forma cónica. El punto final del gotero es un único orificio grande por el cuál fluye el extracto hasta su punto final, se puede encontrar en diferentes materiales como vidrio, cerámica e incluso plástico.

1.10.1.2 Kalita Wave

Otro de los métodos de extracción manuales más conocidos es la Kalita Wave creada por la empresa japonesa Kalita Co®. dedicada a la elaboración de productos para café. La Kalita Wave es una cafetera que pudiera asemejarse a la V60, pero la diferencia más marcada es su fondo plano con tres orificios por donde el agua ira goteando a través de un filtro parecido a una cesta. Este método se puede encontrar de varios materiales como el metal o la cerámica y existen dos tipos de tamaño Kalita Wave 155 y 185 que se diferencian entre sí por su tamaño y capacidad.

1.10.1.3 Filtros de papel

Los filtros de papel son parte fundamental de los métodos de extracción filtrados, a cada método le corresponde un filtro que generalmente suelen ser de papel con forma predeterminada que permiten el correcto funcionamiento y ajuste del goteador. Cualquier cambio de filtro puede afectar el resultado final ya que cada uno tiene una densidad distinta.

Para V60 los filtros son fabricados por la misma marca japonesa “Hario” y presentan una forma cónica que se ajusta a las paredes del método, son filtros hechos de

papel de celulosa no blanqueado que permiten que la filtración sea eficiente reteniendo sedimentos.

Los filtros que se utilizan con kalita tienen una forma ondulada que crea espacio entre el filtro y la pared del método, fabricados por la compañía japonesa Kalita Co. son de papel blanqueado que permite una correcta filtración.

A continuación, se muestra las micrografías tomadas a 25X de ambos filtros de papel:

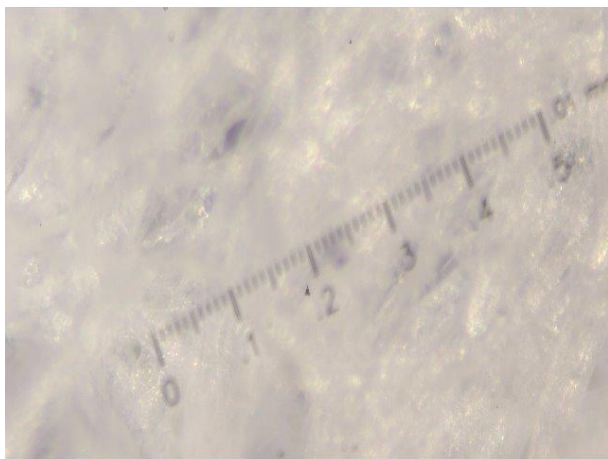


Figura 1. Micrografía a 25X del filtro de papel para V60

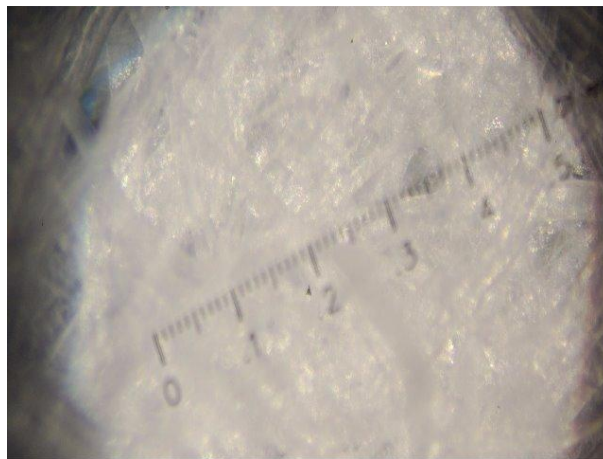


Figura 2. Micrografía a 25X del filtro de papel para Kalita

Las figuras 1 y 2 permiten observar la diferencia de entramado de los hilos entre ambos filtros siendo el de V60 más duro que el de Kalita. Lo anterior se debe a que las fibras se logran ver más compactadas en comparación con el filtro de Kalita. En términos de velocidad de extracción, la V60 es más rápida y permite un mayor flujo de agua gracias al diseño de su filtro en forma de cono (Specialty Coffee Mag, s.f.)

1.11 SCA

La SCA se define a sí misma como “la mayor asociación mundial de comercio del café” que se dedica a promover todo lo relacionado con los aspectos del café, su calidad, sostenibilidad, investigación científica, cata, etc., además es un referente

para muchos expertos en café alrededor del mundo. La SCA ofrece todas las herramientas que fomentan la educación del café a través de certificaciones a productores, tostadores, baristas, catadores y más especialistas que tienen alguna función en todo el proceso del café.

Una de las contribuciones más importantes de la SCA es la publicación de diferentes normas y especificaciones, por ejemplo, la estandarización de condiciones de extracción para tener como resultado tazas de café equilibradas y de buena calidad, estas condiciones involucran la calidad del agua, temperatura de preparación o la razón de proporción agua café. De esta manera, se ha establecido que el agua utilizada debe ser libre de olores y cloro con un pH de entre 6 y 8, además una dureza de 50 a 175 ppm CaCO_3 y alcalinidad equivalente de 40 a 75 ppm de CaCO_3 . La temperatura de extracción debe estar en un rango de 92 a 96°C, mientras que la razón de proporción café agua es de 55 gramos de café por litro de agua lo que equivale a una proporción 1:18

1.12 Compuestos no volátiles en café

La composición del café preparado consta de muchos compuestos que pueden ser clasificados como volátiles o no volátiles. Algunos de los compuestos no volátiles suelen ser los precursores de los compuestos volátiles encargados propiedades sensoriales como el sabor y aroma. De los 1000 componentes volátiles presentes en un café tostado, aproximadamente solo de 30 a 50 componentes son responsables de su aroma. Los compuestos no volátiles con mayor presencia en infusiones de café son principalmente ácido clorogénico, lípidos, ácidos orgánicos, minerales, así como compuestos nitrogenados (Cordoba et al., 2020). De estos compuestos los de mayor relevancia y que han sido más estudiados son: la cafeína, trigonelina y el ácido clorogénico. En extractos de café las concentraciones de cafeína y trigonelina pueden depender de cómo fue preparada la bebida; por su parte, el ácido clorogénico está presente en cantidades abundantes en el café verde, pero llega a degradarse en el tostado, sin embargo, aunque sea en cantidades más reducidas también se puede encontrar en los extractos.

Consumir café tiene muchos beneficios a la salud; por ejemplo, el ácido clorogénico y sus derivados exhiben propiedades funcionales como antiinflamatorios y anticancerígenos (Cordoba et al., 2020) o en el caso de la cafeína que funciona como estimulante del sistema nervioso central.

1.12.1 Ácido clorogénico

El ácido clorogénico es un compuesto fenólico producido por el ácido cafeico y quínico y del cual existen diez isómeros, siendo el ácido 3-cafeoilquínico y el ácido 5-cafeoilquínico los más estudiados (Wang et al., 2022). Una taza de café es una rica fuente de ácido clorogénico que puede proporcionar hasta 300 mg de CGA dependiendo de características como la especie hasta el procesamiento post cosecha de los granos y el tueste (Liang et al., 2016), la especie con mayor contenido de ácido clorogénico es la *canephora* o robusta (Pinheiro et al., 2021).

El ácido clorogénico y sus derivados son precursores del dulce aroma y sabor del café debido a su degradación y transformación durante el tueste en compuestos volátiles que le dan al café su aroma y sabor característicos, es por esto por lo que en granos de café verde el CGA es más abundante que en granos tostados, sin embargo, el mayor consumo de café se da cuando está preparado y el isómero más abundante en extractos es el ácido 5-cafeoilquínico presente hasta en un 48% del total de ácidos clorogénicos, otras fuentes de ácido clorogénico son: la manzana, ciruela pasa, berenjena, té verde, zanahoria, etc. (Wang et al., 2022).

El ácido clorogénico no solo contribuye a los atributos sensoriales del café; también está demostrado que coadyuva a mejorar la salud humana por su capacidad antioxidante, antibacteriana e incluso anticancerígena, además de que puede reducir el riesgo de padecer Alzheimer y diabetes tipo 2 (Rojas González et al., 2022). Dentro de sus propiedades se ha demostrado que también presenta propiedades antiinflamatorias y antivirales y puede ayudar a regular la glucosa en sangre en alguien que padece un síndrome metabólico.

El método más utilizado para cuantificar e identificar ácido clorogénico, cafeína y trigonelina es por medio de HPLC (Liang et al., 2016); aunque también se ha demostrado que con la técnica de FTIR es posible identificar estos compuestos.

1.12.2 Cafeína

La cafeína es de los compuestos más abundantes en el café y es un distintivo que lo caracteriza por sus propiedades estimulantes. Es un alcaloide de la familia de las metilxantinas, considerado como el psicoactivo legal más consumido que se encuentra naturalmente en muchas plantas, granos de café, el cacao y el té (Farikha et al., 2025), aunque también se puede encontrar en algunos fármacos (Doepker et al., 2018), su consumo se considera como una práctica ancestral descubierta por nuestros antepasados al consumir algunas partes de las plantas para aliviar algunos padecimientos y mejorar aspectos como la memoria y el ánimo (Depaula & Farah, 2019).

A diferencia del ácido clorogénico, la cafeína no es precursor de alguna característica sensorial en el café, pero sí de sus propiedades estimulantes. El contenido de cafeína en granos verde no suele ser muy diferente en granos ya tostado, ya que como se mencionó anteriormente, la cafeína es un compuesto termoestable. La concentración de cafeína puede depender de varios factores como el proceso de cultivo (Burdan, 2015) en donde se involucran la latitud, el suelo y la sombra con la que fue cultivada la planta de café, también puede tener variaciones entre especies de café y es sabido que la especie robusta tiene un mayor contenido de cafeína, hasta el doble de lo que se encuentra en la especie arábica (Pinheiro et al., 2021). Este estimulante puede producir algunos beneficios para la salud humana, sin embargo, se debe tener en cuenta que también puede producir riesgos si la ingesta no es la correcta y se consume en exceso, la dosis aceptada sin considerar riesgos en adultos y valorando la mortalidad cardíaca es de 400 mg/día (Doepker et al., 2018) aunque puede depender de factores como la edad y su entorno sociogeográfico (Burdan, 2015).

1.12.3 Trigonelina

La trigonelina es el segundo alcaloide más abundante después de la cafeína en los granos verdes del café (Wale et al., 2024) y se produce naturalmente en ellos y en muchas plantas entre ellas la del café, este compuesto está presente no solo

en los granos si no también en las hojas y flores del cafeto, así como en parte de la cereza del café en general (Konstantinidis et al., 2023). La trigonelina representa entre el 1 y 3% del peso en seco del café por lo que al igual que el ácido clorogénico también es importante precursor de aromas y sabores en el café debido a la formación de compuestos volátiles, además, presenta algunos beneficios a la salud tratando problemas de hiperglucemia o disfunciones hepáticas y renales e incluso evitando problemas dentales como las caries (Nugrahini et al., 2020).

La trigonelina es un componente que se degrada por acción de la temperatura, mientras el tueste sea más intenso menor trigonelina habrá en el café y durante el tostado se forman compuestos como piridinas y pirroles, ácido nicotínico, etc., entre especies la de mayor contenido de trigonelina es arábica y también en algunos estudios se relacionó a un mayor contenido de este compuesto con una mejor calidad en el café (Pinheiro et al., 2021).

El contenido de trigonelina en el café va a depender primordialmente de la especie y variedad del café, aunque también de otros factores como las condiciones de extracción (Munyendo et al., 2021)

1.13 HPLC (Cromatografía líquida de Alto Rendimiento)

HPLC es una técnica cromatográfica ampliamente utilizada en diferentes áreas de investigación para el análisis de muestras líquidas. Esta técnica permite identificar compuestos en mezclas complejas, que, a diferencia de la cromatografía de gases, estos compuestos no son volátiles, esto permite lograr una separación y cuantificación de ellos (Ali, 2022).

Un análisis cromatográfico de HPLC consiste en la inyección de una pequeña cantidad de la muestra dentro de una columna en donde entrara en contacto con una fase estacionaria o columna cromatográfica y una fase móvil bombeada a presión, por lo tanto, la separación se dará de acuerdo con la interacción que tenga con estas fases (Vidushi et al., 2017). La detección de las moléculas eluidas de la columna se deriva de la diferencia de propiedades fisicoquímicas entre estas moléculas y la fase móvil; y a su vez estas diferencias son detectadas por el equipo

cromatográfico mediante señales eléctricas lo que da como resultado un cromatograma de la muestra (Moldoveanu & David, 2022).

1.14 FTIR (Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier)

Es una técnica espectroscópica vibracional que utiliza la región del infrarrojo medio definido por longitudes de onda de entre 2500 nm y 25000 nm. En esta técnica cuando la radiación IR pasa por la muestra, esta tiende a absorberla y parte de ella se transmite; el resultado de este fenómeno tiene como resultado un espectro el cual representa la absorción y transmisión molecular que también se le denomina huella molecular. Los grupos funcionales presentan una frecuencia vibratoria única la cual se emplea para determinar los grupos funcionales que están presentes en una muestra (Franca & Oliveira, 2011).

FTIR es muy utilizado en el análisis de la composición química de alimentos por ser fácil de operar y porque se obtienen resultados fiables y precisos, además no requiere de otros elementos o productos químicos para funcionar, lo que lo hace más económico que otras técnicas que si los requieren; es muy útil para analizar muestras líquidas, aunque también muestras sólidas no requieren de una preparación muy elaborada.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y equipos

A continuación, se presentan los materiales que fueron utilizados durante las diferentes etapas del estudio

2.1.1 Para la preparación de café en taza:

- Granos de café de especialidad tostado y verde (Café arábica variedad *Bourbon* 100%, beneficiado natural, lavado tradicional y *honey*, cultivado en la Finca San Juan del Vesubio ubicada en Yajalón Chiapas a 1,800 m.s.n.m por Elvira Trejo Escobar)
- Gotero de café Kalita Wave 155 (Kalita Co., Japón) de acero inoxidable
- Jarra de vidrio Kalita 500 ml (Kalita Co., Japón) adaptable con goteros de Kalita
- Gotero de café V60 (Hario, Japón) de cerámica
- Hervidor de agua eléctrico “Cuello de ganso” (Timemore, China)
- Molino de muelas eléctrico para café (Sweet Alice, México)
- Filtros de papel para gotero V60 Hario (Hario, Japón) blancos en forma de cono tamaño 02 de un solo uso
- Filtros de papel para gotero Kalita Wave 155 (Kalita Co., Japón) blancos en forma de cesta de un solo uso.

2.1.2 Para el análisis de las muestras:

- FTIR (Bruker Vertex 70, USA)
- HPLC Modelo G1329B (Agilent Technologies, EUA)
- Columna Zorbax Eclipse XBD-C18 (250.0 x 4.6 mm, 5µm) (Agilente Technologies, EUA)
- Precolumna Eclipse XBD-C18 (12.5 x 4.6 mm, 5µm) (Agilent Technologies, EUA)
- Filtros de jeringa estériles 0.45 µm (Minisart NML)
- Viales para HPLC
- Baño ultrasónico (Branson Ultrasonics)

1.1.1.1. Efluentes y reactivos

- Metanol grado HPLC (J.T. Baker, EE. UU.)
- Agua grado HPLC (J.T. Baker, EE. UU.)
- Acetonitrilo grado HPLC (Reactivos Química Meyer)
- Ácido fórmico Solución al 88% (Karal).
- Estándar de CQA (Sigma Aldrich) CAS-No:327-97-9
- Estándar de Cafeína (Sigma Aldrich) CAS-No:58-08-2
- Estándar de trigonelina (Sigma Aldrich) CAS-No:6138-41-6
- Hidróxido de sodio 1N (Materiales y Abastos Especializados, S.A. DE C.V.)

2.2 Métodos

La metodología de este análisis se dividió en 5 fases principales, las cuales se describen a continuación.

2.2.1 Fase 1: Estandarización de la técnica de preparación de extractos de café de especialidad

La elaboración de un extracto de café con granos tostados requiere de partes importantes como lo son: el método de extracción a utilizar, la razón de proporción café y agua, grado de molienda, tipo y temperatura del agua, técnica de extracción, tiempos de extracción (considerando las etapas de extracción: *blooming* y extracción) y por último la turbulencia a la hora de adicionar el agua, por lo que para estandarizar una técnica para obtener cada extracto se utilizaron las mismas condiciones en cada situación.

La técnica de extracción fue definida en base a la experiencia personal adquirida en cursos y talleres en técnicas de barismo, específicamente mediante un curso de métodos de extracción en caliente y frío impartido por “Café Etrusca” y un taller de métodos por goteo impartido por “Experimental: laboratorio y estudio de café. Los conocimientos obtenidos son enfocados al correcto uso de los clásicos métodos de extracción, sobre todo aquellos que funcionan mediante el goteo, así como todas las variables y etapas involucradas en una correcta extracción.

2.2.1.1 Método de extracción

Con el objetivo de establecer las mismas condiciones de extracción se eligieron dos métodos de extracción de café que funcionan a través del goteo, con su respectivo filtro de papel, cada uno con sus particularidades de forma y de calibre: Kalita (Gotero Kalita Wave 155 Co.,Japón) y V60 (Gotero V60 Hario, Japón).



Figura 3. Kalita Wave 155 (Co., Japón)



Figura 4. V60 (Hario, Japón)

2.2.1.2 Razón café agua

La relación café - agua utilizado para este proyecto fue de 1:18 que equivale a 0.055 gramos de café por mililitro de agua, esta razón de proporción se estableció considerando la recomendación de la SCA para la obtención de una buena taza de café. Para fines de este proyecto la cantidad de agua utilizada fue de 252 mL a la que le corresponden, de acuerdo con la proporción, 14 g de café molido.

2.2.1.3 Grado de molienda

De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-F-013-SCFI-2010, para métodos de extracción que funcionan en conjunto con un filtro se recomienda una molienda fina y el grado de molienda correspondiente debe ser mayor o igual a 0.43 mm y menor a 0.72mm por lo que los tamices ideales son del número 40 y 25 respectivamente, sin embargo, al no contar con esos tamices en específico se procedió a utilizar los más próximos disponibles los cuáles fueron del número 20

(0.85 mm) y 35 (0.5 mm). Al pasar el café molido por los tamices del no. 20 y no. 35 el café utilizado para realizar la extracción fue el que se retuvo en el tamiz no. 35.



Figura 5. Café molido en el tamiz

2.2.1.4 Temperatura y tipo de agua

La temperatura juega un papel muy importante a la hora de extraer café ya que puede influir directamente en cuestiones sensoriales, la recomendación de la SCA sobre la temperatura ideal maneja un rango entre los 90° y 96° Celsius. Para fines de este proyecto se optó por elegir una temperatura dentro del rango (92°C) y otra fuera del rango (86°C) para poder identificar las posibles diferencias en los contenidos de cafeína, trigonelina y ácido clorogénico de cada extracto a esas temperaturas.

La marca de agua elegida para hacer los extractos fue en base a algunas de las recomendaciones de la SCA: pH 6.5-7.5, alcalinidad 40 mg/L, sodio 10 mg/L, TDS 75-250 mg/L, cloro 0 mg/L, estas condiciones son para obtener una buena taza de café, por lo que el agua utilizada fue de la marca “Ciel”, que reúne la mayoría de las especificaciones de la SCA y también fue recomendada por un barista de una barra de café de especialidad como la óptima para estandarizar una técnica de extracción de café.

2.2.1.5 Técnica de extracción

Existen muchas formas de extraer café, y es gracias a la experimentación de los baristas para que se puedan obtener las mejores propiedades sensoriales en cada taza, sin embargo, para este proyecto se propuso una técnica clásica con las

etapas vitales (*blooming* y extracción); en la primera etapa la cantidad de agua adicionada fue el triple del total de café, es decir, si se utilizaron 14 g de café molido en el *blooming* se adicionó 42 ml de agua. En la segunda etapa se realizaron 3 vertidos para adicionar el total del agua restante, siendo así, en cada vertido se adicionaron 70 ml de agua.



Figura 7. Blooming: primera etapa de la extracción



Figura 6. Extracto de café recién hecho

2.2.1.6 Tiempos de extracción

Una extracción depende mucho de la mano experimentada de quien lo preparará y si bien no puede ser absolutamente precisa fue necesario practicar sobre cronómetro la cantidad de agua agregada al café en cada una de las etapas de la extracción. El tiempo total fijado entre el vertido del agua y el goteo en el método fue de 45 s, por lo que en el *blooming* la adición de agua o vertido se estableció que fuera en 6 s y el tiempo de goteo restante en 39 s, de la misma forma para los siguientes tres vertidos se fijó un tiempo de 10 s y un tiempo de goteo de 35 s. De esta forma la técnica de extracción se realizó de acuerdo con las condiciones indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Tiempos de extracción para la estandarización de la técnica

Vertidos	Cantidad agua (ml)	Tiempo (s)	Peso final (g)	T vertido (s)	T goteo (s)	Flujo aprox
Blooming	42	45	42	6	39	7 ml/s
1er	70	45	112	10	35	7 ml/s
2do	70	45	182	10	35	7 ml/s
3er	70	45	252	10	35	7 ml/s

2.2.1.7 Turbulencia

Aunque la turbulencia puede producir efectos que afectan a propiedades sensoriales y no está relacionada directamente con el contenido de cafeína, trigonelina y ácido clorogénico se fijó una turbulencia en sentido de las manecillas del reloj a partir de los extremos de la cama de café hacia el centro.

2.2.1.8 Técnica de extracción de granos en verde

De acuerdo con la técnica de Pereira *et al.*, (2022) se hizo la extracción de los granos verdes, la molienda se hizo en una licuadora con el fin de obtener 0.20 g de granos verdes molidos que previamente atravesaron un tamiz de 200µm. En un tubo falcon se agregaron los 0.20 g de granos molidos con 10 mL de ácido acético al 1% para ser sometidos al baño ultrasónico por 90 min. Finalmente se centrifugaron a 1700 rpm por 20 min.

2.2.2 Fase 2: Análisis de las muestras de café en HPLC

La metodología seguida para el análisis de las muestras en HPLC fue de acuerdo con Awwad *et al.* (2021), en un HPLC modelo G1329B (Agilent Technologies, EUA). Las condiciones en el equipo HPLC para las corridas de las muestras tanto para las curvas de calibración como para los extractos de café consistieron en un flujo de 1ml/s, temperatura de 30°C, un volumen de inyección de 10 µL. La detección para ácido clorogénico fue a 330nm y para cafeína y trigonelina 273 nm. El tiempo para cada inyección fue de 7 min y 2 min de postrun. Para ácido clorogénico las fases móviles fueron: a) 0.1% ácido fórmico y b) acetonitrilo en un porcentaje isocrático de 85:15 v/v respectivamente. Para cafeína y trigonelina las fases móviles fueron: a) agua y b) metanol en un porcentaje isocrático de 60:40 v/v

respectivamente. Las fases móviles se sometieron previamente a un baño ultrasónico por 20 min como parte de su tratamiento.

2.2.2.3 Curvas de calibración

2.2.2.3.1 Curva de calibración ácido clorogénico

Para obtener la curva de calibración de ácido clorogénico se preparó una solución madre de 1000 ppm en metanol (el estándar de ácido clorogénico es soluble en metanol), a partir de esta solución madre, se realizaron diluciones para obtener las siguientes concentraciones: 10, 50, 100, 200, 500 y 1000 ppm. Estas diluciones fueron transferidas a viales para HPLC a través de un filtro de jeringa de 0.45 μm . De acuerdo con los cromatogramas, en donde se aprecia el pico característico de cada estándar, se obtuvieron datos de áreas que fueron registrados y a partir de ellos se obtuvo el gráfico, una ecuación predictiva y un coeficiente de correlación R^2 .

2.2.2.3.2 Curva de calibración cafeína

De igual forma que en la curva de calibración de CQA, para la cafeína se preparó una solución madre del estándar en agua con una concentración de 1000 ppm y sus respectivas diluciones con las siguientes concentraciones: 10, 50, 100, 200, 500 y 1000 ppm. Se observó un pico característico para cada concentración en su respectivo cromatograma y se registraron los datos de área resultantes en el pico y fue así como se obtuvo el gráfico, la ecuación y R^2 .

2.2.2.3.3 Curva de calibración trigonelina

En el estudio de Awwad et al. (2021) las condiciones y fases móviles mencionadas anteriormente solo fueron probadas para cafeína y ácido clorogénico, sin embargo, para trigonelina, se decidió utilizar las mismas condiciones y fases móviles fijadas para cafeína obteniendo un buen resultado que consiste en un pico característico a un cierto tiempo. La única diferencia para esta curva de calibración fue la concentración de la solución madre, así como de las diluciones y el número de estas, se realizó una solución madre de 2000 ppm del estándar de trigonelina en agua y las diluciones fueron de 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 1200, 1400 y 2000

ppm. Las concentraciones se establecieron de acuerdo con el valor de área de las muestras reales de extractos de café para ajustar la curva a estos resultados. La lectura de los cromatogramas arrojó valores de área que al ser graficados revelaron la curva de calibración con su respectiva ecuación y coeficiente de correlación.

2.2.2.4 Muestras de extractos de café de especialidad en HPLC

Los extractos de café con sus respectivas características de beneficiado y temperatura fueron centrifugados en un tubo Falcon a 4000 rpm por 20 min para lograr la sedimentación. Después de la centrifugación, una pequeña cantidad de cada una de las muestras de extracto de café se inyectaron a los viales para HPLC, con capacidad de 2 ml, mediante una jeringa y un filtro de 0.45 μm , todo lo anterior es parte de la preparación de la muestra que se debe hacer previamente para que pueda ser inyectada por el equipo correctamente y se eviten posibles tapones en la columna por la cual va a atravesar. El análisis de las muestras por duplicado para cada compuesto (en el caso de la cafeína y trigonelina se utilizó el mismo cromatograma para identificar ambos picos) bajo condiciones especificadas anteriormente por un tiempo total de 9 min.

2.2.3 Fase 3: Análisis de las muestras de café por FTIR

Como alternativa emergente para el análisis de muestras de extractos de café se propone un análisis mediante la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). Una porción de 3 μL de cada uno de los extractos de café se destinó para este análisis llevado a cabo en un espectrómetro FTIR (Bruker Vertex 70, USA) en el modo de muestreo por Reflectancia Total Atenuada (ATR) en el rango comprendido entre 4000-650 cm^{-1} para determinar la presencia de los compuestos de café: ácido clorogénico (1600 cm^{-1}), cafeína (1648-1653 cm^{-1}) y trigonelina (1698 cm^{-1}). Para el análisis de las muestras, se utilizó el programa Originpro versión 6.1 (Massachusetts, EEUU) para graficar cada espectro y hacer la lectura de la absorbancia en los picos característicos de cada compuesto.

2.2.4 Fase 4: Pruebas fisicoquímicas

Como complemento para este proyecto se realizaron pruebas fisicoquímicas adicionales: pH, °Brix, Color y Acidez titulable, con las que se hicieron comparaciones para denotar diferenciaciones entre los extractos de café.

2.2.4.1 Prueba de pH

La prueba de pH se realizó por triplicado con un potenciómetro (Conductronic, México), previamente calibrado con los buffers de calibración con pH de 7 y 4, sumergiendo el electrodo en 50 ml del extracto de café y tomando como resultado el valor dado por el equipo.

2.2.4.2 Prueba de grados Brix

La prueba de grados Brix también se realizó por triplicado en un refractómetro (Atago CO., Japón) anteriormente calibrado con agua, colocando gotas del extracto en la superficie de muestreo y registrando como resultado el valor arrojado en el equipo.

2.2.4.3 Prueba de color

La medición de color se realizó en un colorímetro ColorFlex (HunterLab, Virginia USA) con la escala CIELAB, el equipo se calibró previamente y las lecturas se hicieron con 10 mL de muestra del extracto de café.

2.2.4.4 Prueba de acidez titulable

La acidez titulable se determinó siguiendo la técnica de (Cordoba et al., 2019) de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 5247: Café tostado, en grano o molido. Determinación de la acidez titulable. Esta prueba de acidez se realizó por triplicado en donde a una muestra de 50 ml del extracto de café se le fue agregando pequeños volúmenes de hidróxido de sodio, con una concentración de 0.1 mol/l, a través de una pipeta volumétrica. A su vez, la muestra estaba siendo agitada mediante un agitador magnético y al mismo tiempo el pH estaba siendo monitoreado con un potenciómetro. El volumen de hidróxido de sodio gastado fue determinado hasta que el pH llegara a 6.5 por lo tanto este fue el volumen de equivalencia. Ya que la acidez titulable del café se expresa en mg de ácido clorogénico en 1 g de café la expresión para calcular la acidez titulable resultante es (Ec.1):

$$\frac{ml \text{ gastados de NaOH} * \text{concentración NaOH} * \text{factor de dilución} * PM \text{ ac. clorogénico}}{g \text{ de café}} = \text{acidez titulable}$$

En donde el factor de dilución es igual a 2 y el peso molecular de ácido clorogénico es igual a 354.31 g/mol.

2.2.5 Fase 5: Diseño experimental y análisis PCA

El tipo de diseño corresponde a uno completamente aleatorizado, con un análisis estadístico de ANOVA con comparación de media de Tukey. El método de comparación entre tratamientos (método de extracción, temperatura y beneficiado) fue por medio de parámetros fisicoquímicos como pH, Brix, acidez titulable y color por espectro UV así como la concentración de los compuestos en el software Minitab (PA, EEUU). Finalmente se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para correlacionar los análisis llevados a cabo en HPLC y FTIR tanto para café tostado como para café en grano verde con el software OriginPro (EEUU).

2.2.5.1 Nomenclatura del análisis HPLC

El análisis en HPLC se realizó por duplicado para cada muestra siguiendo la siguiente nomenclatura para identificar cada vial:

- Primera letra: Método (K para Kalita y V para V60)
- Número: Temperatura (92 para 92°C y 86 para 86°C)
- Segunda letra: Beneficiado (N para natural, L para lavado y H para honey)

Número final: Repetición (1 para primera inyección y 2 para duplicado)

2.2.5.2 Nomenclatura para ANOVA

La nomenclatura usada para el análisis ANOVA con comparación de media de Tukey en el software Minitab fue la siguiente:

- Método: 1 para Kalita y 2 para V60
- Temperatura: 92 y 86
- Beneficiado: 1 para natural, 2 para lavado y 3 para *honey*

2.2.5.3 Nomenclatura para PCA

La nomenclatura utilizada para realizar el PCA fue el mismo utilizado para los análisis anteriores de ANOVA y los vectores están identificados de la siguiente forma:

- C CGA: concentración de ácido clorogénico medida en HPLC
- C Cafeína: concentración de cafeína medida en HPLC
- C Trigonelina: concentración de trigonelina medida en HPLC
- CGA: absorbancia leída para ácido clorogénico en FTIR
- CAF: absorbancia leída para cafeína en FTIR
- TRIGO: absorbancia leída para trigonelina en FTIR

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Curvas de calibración

Se realizaron las curvas de calibración para cada compuesto mediante la inyección del estándar a diferentes concentraciones en el equipo de HPLC con las especificaciones mencionadas anteriormente para cada situación.

3.1.1 Curva de calibración ácido clorogénico

A continuación, se muestra en la figura el gráfico de la curva de la calibración para ácido clorogénico a partir de su estándar con las siguientes concentraciones: 10, 50, 100, 200, 500 y 1000 ppm.

Del ajuste por regresión lineal se obtuvo un factor de correlación $R^2 = 0.98$ y la ecuación de la recta fue la siguiente: $y = 24.933x + 661.5$

Donde:

y = Área (del pico característico para CGA en el cromatograma obtenido en HPLC)

x = Concentración de ácido clorogénico (ppm)

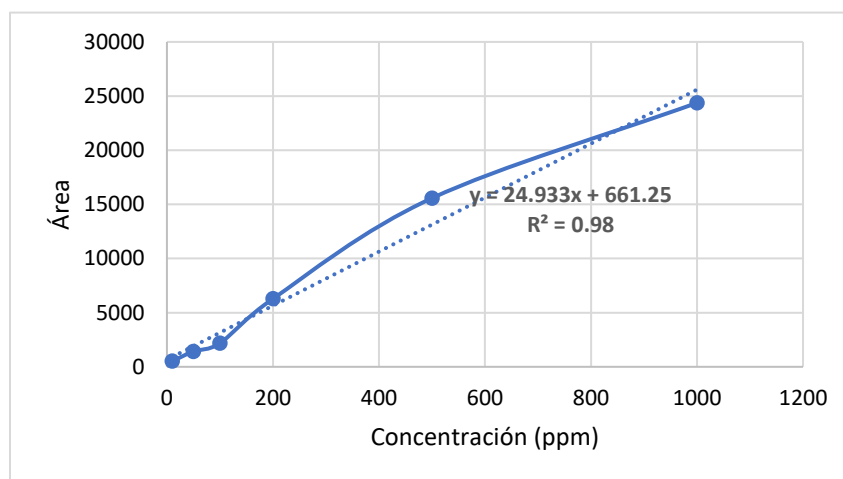


Figura 8. Curva de calibración de ácido clorogénico

3.1.2 Curva de calibración cafeína

A continuación, se muestra en la figura- el gráfico de la curva de calibración para cafeína a partir del estándar en las siguientes concentraciones: 10, 50, 100, 200, 500 y 1000 ppm.

El ajuste por regresión lineal arrojó un factor de correlación $R^2 = 0.99$ y la ecuación de la recta fue: $y = 27.11x + 497.12$

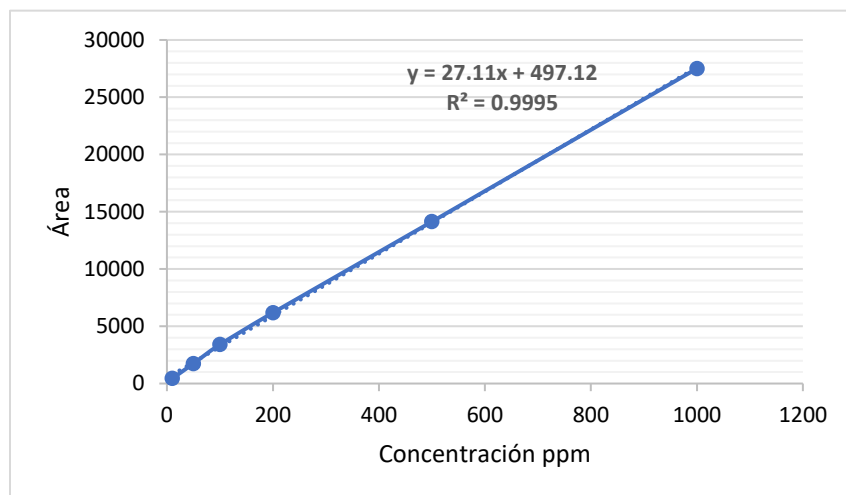


Figura 9. Curva de calibración de cafeína

3.1.3 Curva de calibración de trigonelina

En la figura se observa la curva de calibración de trigonelina que resultó de la inyección del estándar en HPLC en diferentes concentraciones que fueron: 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 1200, 1400 y 2000 ppm.

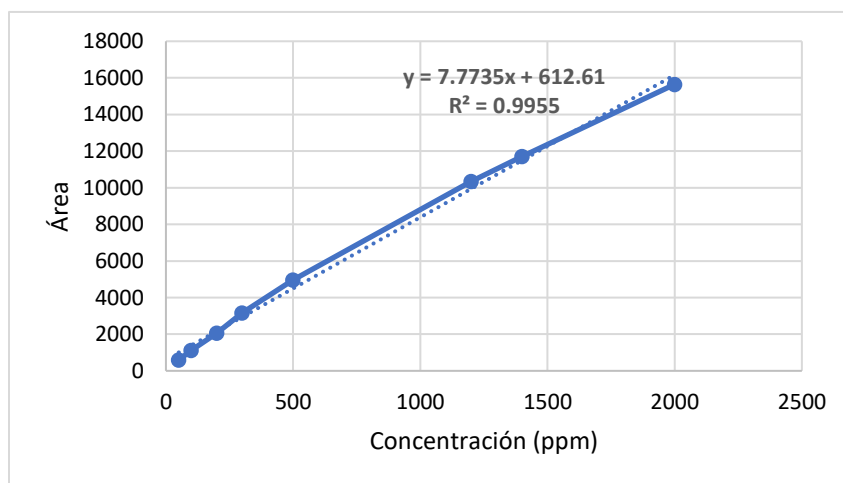


Figura 10. Curva de calibración de trigonelina

Se obtuvo un factor de correlación $R^2 = 0.99$ y la ecuación predictiva fue $y = 7.7735x + 612.61$

3.2 Concentraciones en extractos de café

3.2.1 Concentraciones obtenidas en HPLC

El cálculo de las concentraciones se hizo con base en los valores de área leídos en el resumen de cada cromatograma y las ecuaciones predictivas de las curvas de calibración. El tiempo de retención en donde el pico característico aparece en el cromatograma fueron 2, 4 y 4 min, trigonelina, cafeína y CGA, respectivamente.

El registro de los datos obtenidos mediante el equipo HPLC correspondientes a las concentraciones calculadas en ppm para cada muestra y su duplicado se encuentran en la sección de anexos. El análisis ANOVA con media de Tukey de las concentraciones de los compuestos y de los parámetros fisicoquímicos se realizó para hacer las comparaciones tanto de un solo factor como de las interacciones entre ellos. A continuación, en el análisis para determinar diferencias significativas se mostrará únicamente el condensado de información que pertenece a la interacción entre los 3 factores: Método*Temperatura*Beneficiado

3.3.1.1 Contenido de compuestos no volátiles en extractos de café de especialidad

Tabla 2. Concentración de cafeína en extractos de café de especialidad (mg/g)

Cafeína	Tipo de beneficiado					
	Natural		Lavado		Honey	
	Temperatura (°C)					
Método	92	86	92	86	92	86
Kalita	13.2±0.12 ^{Aa}	13.44±0.23 ^{Aa}	13.02±0.15 ^{Aa}	12.83±0.2 ^{Aa}	13.54±0.15 ^{Aa}	12.94±0.07 ^{Aa}
V60	12.77±0.16 ^{Aa}	12.58±0.12 ^{Ab}	12.75±0.08 ^{Aa}	12.86±0.21 ^{Aa}	12.95±0.21 ^{Aa}	12.62±0.11 ^{Aa}

Mayúsculas diferentes en la misma fila en el mismo esquema de beneficiado representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos a través del ANOVA respecto a la concentración de cafeína de los extractos de café entre los cuales no hubo

diferencia significativa ($p>0.05$) independientemente del tipo de beneficiado, la temperatura de extracción y el método empleado. Sin embargo, se presentó una excepción en los extractos obtenidos a 86° con beneficiado natural y esta diferencia significativa ($p<0.05$) se derivó por la influencia del método de extracción. En esta diferencia se observó que el extracto con V60 obtuvo una concentración más baja que el preparado con Kalita, y aunque en los demás casos no hubo diferencias significativas, se puede notar la misma tendencia.

La cafeína es un compuesto termoestable, incluso durante el tueste (Cwиковá et al., 2022), por lo que cobra sentido que la temperatura de extracción no tenga un gran impacto en el contenido de cafeína extraído. De forma similar a estos resultados, Muzykiewicz-Szymańska et al. (2021) tampoco encontró diferencias por la influencia de la temperatura de extracción en extractos de café tostado de diferentes partes del mundo en rangos de $84-86^{\circ}\text{C}$ y $93-95^{\circ}\text{C}$.

El tipo de beneficiado puede afectar en la composición química del café (Duarte et al., 2010); sin embargo, para el contenido de la cafeína no es un factor que haya afectado su concentración a pesar de las condiciones en las que se llevan a cabo los tres beneficiados considerados ya que la cafeína se considera estable a estos cambios como la trigonelina y los resultados obtenidos se respaldan con lo hecho por Cwиковá et al. (2022) que al someter a estudio muestras de cafés de 15 regiones del mundo bajo los beneficiados natural y húmedo tampoco reportó diferencias significativas ($p>0.05$) en el contenido de cafeína de cada muestra.

La única condición que marcó una diferencia en cuanto a cafeína es por el efecto del método de extracción, aunque aún no hay estudios científicos que comprueben estas diferencias entre métodos de extracción filtrados específicamente con V60 y Kalita. En este caso, la forma del goteador hace que el flujo del agua sea diferente lo cual influye en los tiempos de contacto, por lo que la cantidad de cafeína cambia entre uno y otro.

Tabla 3. Concentración de trigonelina de los extractos de café de especialidad (mg/g)

Trigonelina	Tipo de beneficiado					
	Natural		Lavado		Honey	
	Temperatura (°C)					
Método	92	86	92	86	92	86
Kalita	17.71±0.44 ^{Ba}	21.64±0.51 ^{Aa}	17.61±0.77 ^{Ab}	18.23±0.92 ^{Ab}	20.01±0.26 ^{Ab}	18.71±0.21 ^{Bb}
V60	20.71±2.09 ^{Aa}	25.25±0.36 ^{Aa}	25.73±0.03 ^{Aa}	26.08±0.25 ^{Aa}	25.74±0.58 ^{Aa}	24.01±0.62 ^{Aa}

Mayúsculas diferentes en la misma fila en el mismo esquema de beneficiado representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

Los resultados de la Tabla 3 pertenecen a los obtenidos mediante ANOVA respecto a la concentración de trigonelina de los extractos de café de especialidad, en los cuales se observaron algunas diferencias significativas en casos específicos. Uno de estos casos corresponde a los extractos que fueron hechos con Kalita en donde se identificó diferencia significativa ($p < 0.05$) por el efecto de la temperatura de extracción en beneficiados natural y *honey*. La trigonelina es un compuesto que tiene buena solubilidad en el agua, por lo tanto, esta condición de extracción es la más influyente de las 3 consideradas. De acuerdo con Stanek et al. (2021) el rendimiento de la extracción de trigonelina aumenta al elevar la temperatura de extracción; sin embargo, este efecto no se cumplió para un beneficiado natural donde se obtuvo una mayor concentración con la temperatura más baja. La influencia de la temperatura no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) para extractos de V60.

La influencia del método de extracción detonó diferencias significativas ($p < 0.05$) en los extractos con granos de beneficiado lavado y *honey*, en donde se observó que los que presentaron mayores concentraciones de trigonelina fueron los preparados con V60. A pesar de que no existen estudios publicados que muestren la razón de estas diferencias, se puede suponer que ocurre algo similar a lo que pasa con la cafeína, en donde la forma del goteador y los tiempos de contacto son los que juegan un rol clave que ayuda a justificar las diferencias observadas.

Como última instancia, el tipo de beneficiado de los granos no representó diferencia significativa ($p > 0.05$) en los resultados obtenidos y esto puede deberse a que la mayor concentración de trigonelina está presente en el grano verde como tal, aunque también se encuentra en menor cantidad en otras capas de la cereza. Resultados similares a los de la tabla 3 los demostró Tieghi et al. (2024) al relacionar

el origen de cafés de especialidad brasileños con su procesamiento post cosecha, en donde no obtuvo diferencias significativas ($p>0.05$) en el contenido de trigonelina que involucre a los beneficiados natural y *honey* o despulpado.

Tabla 4. Concentración de ácido clorogénico de los extractos de café de especialidad (mg/g)

CGA	Método de extracción			
	Kalita		V60	
	Temperatura (°C)			
Beneficiado	92	86	92	86
Natural	15.8±0.54 ^{Aa}	16.03±0.007 ^{Aa}	15.91±0.25 ^{Aa}	16±0.12 ^{Aa}
Lavado	13.3±0.12 ^{Aa}	13.15±0.08 ^{Ac}	13.41±0.05 ^{Ac}	13.5±0.02 ^{Ac}
Honey	15.3±0.008 ^{Ab*}	14.58±0 ^{ABb}	14.78±0.001 ^{ABb}	14.37±0.002 ^{Bb}

Mayúsculas diferentes en la misma fila bajo el mismo esquema de método de extracción representan una diferencia significativa ($p<0.05$)
Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p<0.05$)

Aunque una gran parte de CGA se degrada en compuestos volátiles durante el tostado de los granos, este compuesto se encuentra presente en menor cantidad en los granos ya tostados. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos de la concentración de ácido clorogénico CGA de los extractos de café de los cuales se observó que prácticamente no existieron diferencias significativas ($p>0.05$) que involucren tanto a la temperatura como al método de extracción bajo un mismo beneficiado. El ANOVA correspondiente a este caso (disponible en el anexo IV) mostró en primera instancia que estas dos variables no representaron cambios en la concentración de trigonelina, pero se observó que valores mayores se obtuvieron a una mayor temperatura y esto puede deberse a que el ácido clorogénico es soluble en agua.

El efecto entre los dos métodos de extracción empleados no representó diferencias entre los extractos. Sin embargo, la evidencia científica que identifique como cambia la concentración entre uno y otro es muy escasa. Contrario a los resultados obtenidos en el presente estudio, Zapata et al. (2019) si reportó diferencias significativas ($p<0.05$) al cuantificar el contenido de CGA entre métodos (Kalita y V60) obteniendo mayores concentraciones con V60.

La variable que si tuvo un fuerte impacto para CGA fue el tipo de beneficiado ya que la mayoría de los extractos mostraron diferencias significativas ($p<0.05$) debido a esta variable, siendo que los mayores valores se presentaron en beneficiados

naturales, seguido de los *honey* y finalmente lavados. Estas diferencias pueden deberse a la solubilidad del ácido clorogénico en agua que en un beneficiado por lavado se puede perder cierta cantidad de este compuesto por la remoción de las capas de la cereza con agua, a diferencia de beneficiados naturales y *honey* donde se conservan todas las capas o parte de mucílago, respectivamente.

Tabla 5. pH de los extractos de café de especialidad

pH	Temperatura (°C)					
	92			86		
	Beneficiado					
Método	Natural	Lavado	Honey	Natural	Lavado	Honey
Kalita	4.73±0.02 ^{Bb}	4.81±0.01 ^{Aa}	4.67±0.01 ^{Ca}	4.72±0.01 ^{Ba}	4.82±0.01 ^{Aa}	4.67±0.01 ^{Ca}
V60	4.78±0.02 ^{Aa}	4.79±0.01 ^{Aa}	4.68±0.01 ^{Ba}	4.73±0 ^{Ba}	4.8±0.01 ^{Aa}	4.7±0.01 ^{Ca}

Mayúsculas diferentes en la misma fila bajo el mismo esquema de temperatura representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

Los resultados mostrados en la tabla 5 corresponden al pH medido de cada extracto de café de especialidad. En primera instancia, se observó que la variable que más influye en el pH es el tipo de beneficiado y encontrándose diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en cuanto a esta variable en extractos bajo una misma temperatura y método de extracción. La tendencia que se observó entre los 3 métodos indica que el pH más bajo corresponde al café que fue beneficiado como *honey*, seguido por natural y finalmente lavado es el método que proporciona un pH más elevado en el café, lo cual es razonable debido a las condiciones en las que se lleva a cabo cada tipo de beneficiado. En un beneficiado *honey*, al conservar un porcentaje de mucílago en el grano durante su secado, tiende a producirse una fermentación lo que incrementa la acidez en el café al generar ácidos. El café beneficiado de forma natural, al tener un tiempo de contacto considerable con todo el fruto absorben más ácidos (Ferreira, et al., 2019). Por el contrario, en un beneficiado por lavado la remoción de todo el mucílago se realiza con agua y el grano queda completamente limpio. Los resultados de la tabla 5 tienen concordancia con lo mostrado por Rodríguez et al. (2020) al obtener diferencias significativas ($p < 0.05$) en el pH en cafés de especialidad colombianos procesados por un beneficiado húmedo y semiseco, siendo que los más ácidos tienen relación con el proceso semiseco o también llamado *honey*.

La temperatura de extracción no representó una influencia en los valores de pH de los extractos por lo que se puede decir que con una diferencia de 6° C en temperaturas altas de extracción no existió diferencia significativa ($p>0.05$), sin embargo, sería interesante comparar resultados de pH entre temperaturas altas de extracción y temperaturas bajas para obtener *cold brew* donde se ha comprado que si existen diferencias significativas en el pH del café que implica una mayor diferencia en grados de la temperatura de extracción (Rao et al, 2020).

El método de extracción es otra de las variables que no representó un impacto en el pH de los extractos y por lo tanto no se muestran diferencias significativas ($p>0.05$). Esto puede deberse a que los ácidos del café son solubles en agua, lo cual no cambiaría independientemente del método que se utilice. En este sentido, los resultados de la tabla 5 son diferentes a lo que reportó Zapata et al. (2019) al comparar los extractos preparados con los dos métodos de extracción filtrados: V60 y Kalita de los cuales obtuvo diferencias significativas ($p<0.05$) en el pH entre cada uno.

Tabla 6. Grados Brix de los extractos de café de especialidad

°Brix	Método de extracción			
	Kalita		V60	
	Temperatura (°C)			
Beneficiado	92	86	92	86
Natural	3±0 ^{Ba}	3.26±0.1 ^{Aa}	1.76±0.1 ^{Ca}	1.8±0.1 ^{Ca}
Lavado	3.13±0.05 ^{Aa}	3.1±0 ^{ABb}	1.8±0 ^{Ca}	1.83±0.05 ^{Ca}
Honey	3.2±0 ^{Aa}	2.93±0.05 ^{Bc}	1.83±0.05 ^{Ca}	1.93±0.05 ^{Ca}

Mayúsculas diferentes en la misma fila bajo el mismo esquema de método de extracción representan una diferencia significativa ($p<0.05$)
Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p<0.05$)

La tabla 6 muestra los resultados de las mediciones de °Brix de los extractos de café de especialidad donde se puede observar que el método de extracción es el que tuvo la mayor influencia en el valor de °Brix, existieron diferencias significativas ($p<0.05$) entre extractos a una misma temperatura y beneficiado, pero con diferente método. Los extractos con Kalita son los que mostraron mayores valores por lo que se puede decir que la bebida es más concentrada con este método que con V60 ya que los grados °Brix son una medida de los sólidos solubles. La relación entre el método de extracción y °Brix puede deberse a las condiciones

de extracción en el método como el flujo del agua, el tiempo de contacto entre agua y café e incluso el filtro, sin embargo, no hay información disponible que pueda justificar con precisión el porqué. Resultados similares a los de la tabla 6 obtuvo Zapata et al. (2019) quienes identificaron diferencias significativas ($p<0.05$) entre extractos preparados con V60 y Kalita, teniendo como resultado un valor mayor de °Brix los extractos de provienen de una Kalita.

La temperatura presentó algunas diferencias que no son muy marcadas, por lo que no tuvo un impacto considerable en los °Brix. En un estudio de Liang et al (2021) indica que los TDS no suelen cambiar por efecto de la temperatura en inmersiones en un rango de 80-99°C por lo que puede ser respuesta al porqué los °Brix no cambian con esa diferencia de temperatura.

De la misma forma ocurre con el tipo de beneficiado, en donde prácticamente no existieron diferencias significativas ($p>0.05$) con excepción de los extractos preparados con Kalita a 86°C y esto puede deberse a que el beneficiado afecta directamente al contenido de azúcares en el grano verde que después se caramelizan durante el tostado lo que desarrolla aroma y sabor (Aung Moon et al.,2024). Es por esto que los cambios en los extractos de café por el tipo de beneficiado son más a nivel sensorial.

Tabla 7. Valores de luminosidad L* de los extractos de café de especialidad

L*	Método de extracción			
	Kalita		V60	
	Temperatura (°C)			
Beneficiado	92	86	92	86
Natural	6.41±0.06 ^{Aa}	4.65±0.12 ^{Bb}	6.46±0.04 ^{Aa}	3.85±0.079 ^{Cb}
Lavado	5±0.12 ^{Ab}	5.003±5 ^{Aa}	4.66±0.04 ^{Bb}	3.96±0.075 ^{Cb}
Honey	3.77±0.07 ^{Bc}	4.95±0.02 ^{Aa}	3.67±0.102 ^{Bc}	5.01±0.04 ^{Aa}

Mayúsculas diferentes en la misma fila bajo el mismo esquema de método de extracción representan una diferencia significativa ($p<0.05$)

Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p<0.05$)

Los valores de la tabla 7 corresponden a los resultados de la coordenada L* luminosidad que permiten describir el color de los extractos de café de especialidad. El color de los granos de café depende enormemente del proceso de tostado, sin embargo, al revisar los valores de la tabla anterior se puede notar que las 3 variables

consideradas: método y temperatura de extracción, así como el tipo de beneficiado tuvieron un efecto en la luminosidad.

Al observar el anova para el parámetro L^* (disponible en el anexo V) se puede notar que cada variable, así como sus interacciones con las demás representan diferencias significativas ($p < 0.05$). Los puntos que se pueden destacar es que el beneficiado natural proporcionó valores mayores de L^* lo que significa que fueron los extractos más claros, seguidos de los lavados y los más oscuros corresponden a los honey. Estos resultados son debido a las condiciones en las que se lleva a cabo el procesamiento que determinan el color del grano aún verde. En un beneficiado honey, las condiciones de secado en conjunto con el porcentaje de mucilago conservado pudieran resultar en un grano con colores más oscuros. Existe evidencia reportada de que los granos tanto tostados como en verde con beneficiado natural son los que presentaron luminosidades más altas frente a los otros beneficiados, tal es el caso reportado Cortés Macías et al. (2022) y Juárez Gonzales et al. (2021).

Haciendo una comparación entre métodos de extracción, se observó que en la mayoría de los casos los extractos con un valor más alto en luminosidad fueron aquellos preparados con Kalita; sin embargo, no hay una evidencia documentada de que esto se cumpla en todos los casos. Respecto a la temperatura, también se pudo notar que en varios casos los extractos más oscuros generalmente fueron los obtenidos a 92°C , aunque no hay una tendencia específica ni evidencia que lo justifique.

Tabla 8. Valores de la coordenada a^ de los extractos de café de especialidad*

a*	Método de extracción			
	Kalita		V60	
	Temperatura (°C)			
Beneficiado	92	86	92	86
Natural	0.215 ^{Ab} ±0.106	-0.215 ^{Bb} ±0.007	0.18 ^{Aa} ±0.155	-0.4 ^{Bc} ±0.07
Lavado	0.91 ^{Aa} ±0.08	-0.205 ^{Cb} ±0.007	-0.005 ^{BCab} ±0.049	-0.155 ^{Cbc} ±0.03
Honey	0 ^{BCb} ±0.08	0.88 ^{Aa} ±0.014	-0.2 ^{Cb} ±0.056	0.235 ^{Ba} ±0.04

Mayúsculas diferentes en la misma fila bajo el mismo esquema de método de extracción representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)
Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

La tabla 8 muestra los valores obtenidos para la coordenada a^* en los extractos de café de especialidad. La coordenada a^* en el espacio de color CIELAB representa

la variación que existe entre el rojo y el verde, si el valor a^* es positivo tiende hacia el rojo y si es negativo tiende hacia el verde.

Al igual que con la luminosidad, las 3 variables y sus interacciones representan diferencias significativas ($p < 0.05$), aunque la tendencia en estas diferencias no es muy clara, se pudo observar que con la temperatura más alta de 92°C los valores fueron generalmente positivos por lo que tienden hacia el rojo y con 86°C los extractos en su mayoría negativos por lo que fueron más verdosos. Sin embargo, se identificó que para honey el comportamiento fue diferente e incluso contrario a lo anterior, prueba de ello es que el extracto más rojo de todos fue el preparado con Kalita a 86°C .

Para efectos de la coordenada a^* , en este sistema las diferencias entre extractos por efecto del beneficiado siguen una tendencia en específico, sin embargo, hay estudios que demuestran una ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) en a^* en café tratado con diferentes beneficiados, tal como lo reportó Cwиковá et al. (2022), Rodriguez et al. (2020) y Cortés Macías et al. (2022).

Tabla 9. Valores de la coordenada b^ de los extractos de café de especialidad*

b*	Método de extracción			
	Kalita		V60	
	Temperatura (°C)			
Beneficiado	92	86	92	86
Natural	6.49 ^{Aa} ±0.21	4.27 ^{Bb} ±0.26	6.59 ^{Aa} ±0.2	3.37 ^{Cb} ±0.23
Lavado	4.9 ^{Ab} ±0.18	5.01 ^{Aa} ±0.02	4.26 ^{Bb} ±0.26	3.38 ^{Cb} ±0.26
Honey	3.58 ^{Bc} ±0.18	5.01 ^{Aa} ±0.23	3.4 ^{Bc} ±0.19	4.85 ^{Aa} ±0.02

Mayúsculas diferentes en la misma fila bajo el mismo esquema de método de extracción representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)
Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

La tabla 9 muestra los valores de la coordenada b^* de color de los extractos de café de especialidad que expresa la gama de colores entre el amarillo y el azul, en donde si el valor es positivo hay una tendencia hacia el amarillo y si es negativo la tendencia es hacia el azul. En este caso, se pudo observar es que al igual que las dos coordenadas anteriores las 3 variables y sus interacciones afectan el resultado de b^* por lo que se identificó diferencias significativas ($p < 0.05$).

Se identificó que todos resultados que se obtuvieron son positivos lo que indica que la tonalidad de todos los extractos tiene una tendencia hacia el amarillo;

sin embargo, no se logró notar una tendencia en específico a pesar de que se identificaron algunos puntos. Uno de estos puntos fue que los extractos más amarillentos, es decir, los que tuvieron valores mayores en a^* , se dieron con un beneficiado natural a 92°C en ambos métodos.

También se pudo notar que para 92°C en ambos métodos los valores de a^* decrecieron de natural a honey. Por el contrario, a 86°C el decrecimiento iba de honey a natural y esto puede deberse a la interacción entre temperatura y tipo de beneficiado. Resultados similares reportó Cortés Macías et al. (2022) al estudiar la repercusión del nivel de tostado en los granos colombianos, así como su beneficiado encontrando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre granos de tueste medio y tres tipos de beneficiado: seco, húmedo y semiseco. Por lo tanto, considerar al tostado podría ser una opción para justificar con más claridad cómo cambia el color debido a ello.

Tabla 10. Acidez titulable de los extractos de café de especialidad

Acidez titulable	Método de extracción			
	Kalita		V60	
	Temperatura (°C)			
Beneficiado	92	86	92	86
Natural	22.61±0.58 ^{Bb}	25.17±0.77 ^{Aa}	23.12±0.77 ^{Bb}	24.83±0.29 ^{Ab}
Lavado	20.91±0 ^{Bc}	20.23±0.77 ^{Bb}	21.08±0.29 ^{ABc}	21.59±0.29 ^{Aa}
Honey	27.89±0.29 ^{Aa}	25.34±0.77 ^{ABa}	26.87±0.77 ^{Aa}	25.17±0.29 ^{Ba}

Mayúsculas diferentes en la misma fila bajo el mismo esquema de método de extracción representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)
Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

La tabla 10 muestra los valores de las mediciones de acidez titulable de todos los extractos de café de especialidad que fueron analizados y de los que se observa que la variable que tuvo un mayor impacto en la acidez titulable fue el tipo de beneficiado, por lo que se presentó diferencia significativa ($p < 0.05$). Se identificó una tendencia que va desde los que tuvieron una acidez más alta con honey, los de acidez intermedia con natural y finalmente los que presentaron acidez más baja con lavado. El hecho de que con honey la acidez sea mayor frente a los otros tiene que ver con las condiciones en las que se procesa el café recordando que se conserva un porcentaje de mucílago en el grano lo que propicia una fermentación la cual puede dar origen a la formación de ácidos en el grano. Un estudio confirmó que en

el beneficiado *enmielado* o *honey* se incrementa la acidez a diferencia del lavado aún en procesos de fermentación con bacterias ácido-lácticas (Lydia et al., 2024)

En algunos casos, la temperatura de extracción también representó diferencias significativas ($p < 0.05$) y el método de extracción, prácticamente no influyó en este parámetro.

3.3.2 Análisis de varianza para café verde

A continuación, se muestra el análisis de ANOVA para los extractos de café en verde, los cuáles solo se diferenciaron entre sí por el tipo de beneficiado dado a los granos.

3.3.2.1 Contenido de compuestos no volátiles en extractos de café verde de especialidad

Tabla 11. Concentración de cafeína, trigonelina y ácido clorogénico en los extractos de café verde (mg/g)

Beneficiado	Cafeína	Trigonelina	CGA
Natural	9.65 ^a ±0.5	9.46 ^a ±0.19	31.62 ^a ±0.07
Lavado	9.45 ^a ±0.28	9.81 ^a ±0.03	29.35 ^{ab} ±0.74
Honey	9.17 ^a ±0.26	9.38 ^a ±0.14	27.39 ^b ±0.62

Minúsculas diferentes en la misma columna representan una diferencia significativa ($p < 0.05$)

El procesamiento de las cerezas de café puede influir en la composición química en el café verde; no obstante, como se puede observar en la tabla 11 tanto para cafeína como para trigonelina no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el contenido de ambos compuestos por la influencia del beneficiado al que fueron sometidos los granos de café. Esto sucede también para el café tostado y puede deberse a que en ambos alcaloides el efecto del agua no afecta su contenido en el grano por lo que no se degradan (Yulianti et al., 2023).

Worku et al. (2023) comprobaron resultados similares a este sentido y no encontraron diferencias significativas entre granos tratados con el método seco y húmedo para granos de café arábica etíopes. De forma similar, Yulianti et al. (2023) mostraron que para granos verdes de café arábica provenientes de Indonesia el porcentaje de alcaloides (en donde predominan cafeína y trigonelina), no presentaron diferencias significativas entre los beneficiados natural - *honey* y *honey*

- lavado, pero si entre natural – lavado, por lo que concuerdan con los resultados mostrados en este proyecto.

De acuerdo con la literatura, el contenido de ácido clorogénico en granos de café verde es mayor que en granos de café tostados. Esto se debe a que el ácido clorogénico es un compuesto precursor de otros compuestos volátiles que se originan durante el tostado, por lo que provocan su degradación. Si se comparan los valores de la tabla 4 y 11, la diferencia que se observa es clara y se puede llegar a degradar hasta en un 67%, como lo confirmó (Diviš et al., 2019) al realizar un estudio para verificar el efecto que tiene el tostado en la composición química del café.

Caso contrario a la cafeína y trigonelina, el ácido clorogénico en café verde si tuvo diferencia significativa ($p < 0.05$) entre dos tipos de beneficiado en específico natural y *honey*, con el beneficiado lavado es un punto intermedio entre ambos. Estos resultados concuerdan con lo demostrado por Tieghi et al. (2024) que, para muestras de café verde reportó diferencias significativas ($p < 0.05$) en el contenido de ácido clorogénico en granos tratados por el método natural y el método despulpado o también considerado como *honey*.

3.3 Análisis de FTIR

Los análisis hechos mediante la técnica de FTIR dan como resultado un espectro por cada extracto. En cada espectro, se leyeron las absorbancias en el pico característico en el número de onda correspondiente a cada compuesto: cafeína (1653 cm^{-1}), trigonelina (1698 cm^{-1}) y ácido clorogénico (1603 cm^{-1}). Para verificar en qué rango de número de onda se encuentra cada pico característico, previamente se obtuvieron los espectros de soluciones con el estándar de cada componente que se muestran en la figura 4.

Los espectros de cada extracto, así como los resultados de las absorbancias leídas se muestran en los anexos -. Estos datos de absorbancia fueron utilizados para el análisis PCA.

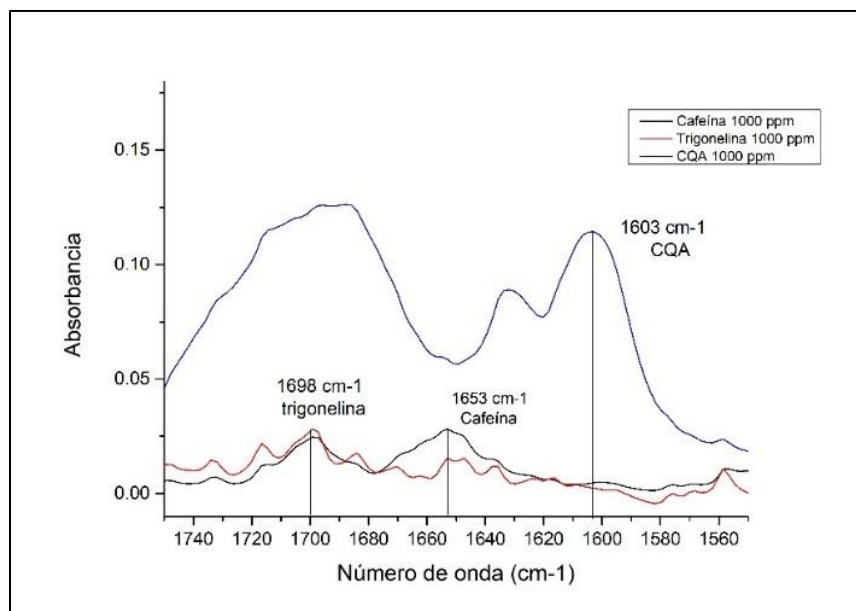


Figura 11. Número de onda donde se identifica el estándar de cada compuesto

3.4 PCA

A continuación, se muestra el análisis de componentes principales PCA realizados para los extractos de café tostado y verde por separado, con la ayuda de estos análisis se pudo observar cómo se agrupan y en qué se diferencian los datos de acuerdo con su varianza en función de las concentraciones de cada compuesto, cafeína, trigonelina y ácido clorogénico y las absorbancias leídas mediante FTIR (asociadas a una concentración). Los gráficos biplot se realizaron en el software OriginPro 2025.

3.5.1 PCA de café tostado

El análisis PCA de café tostado bajo tres componentes resultó con un acumulado del 92.01%. Este gráfico dio la oportunidad de tener un mayor panorama de cómo se comportan las muestras en función a las variables anteriormente mencionadas.

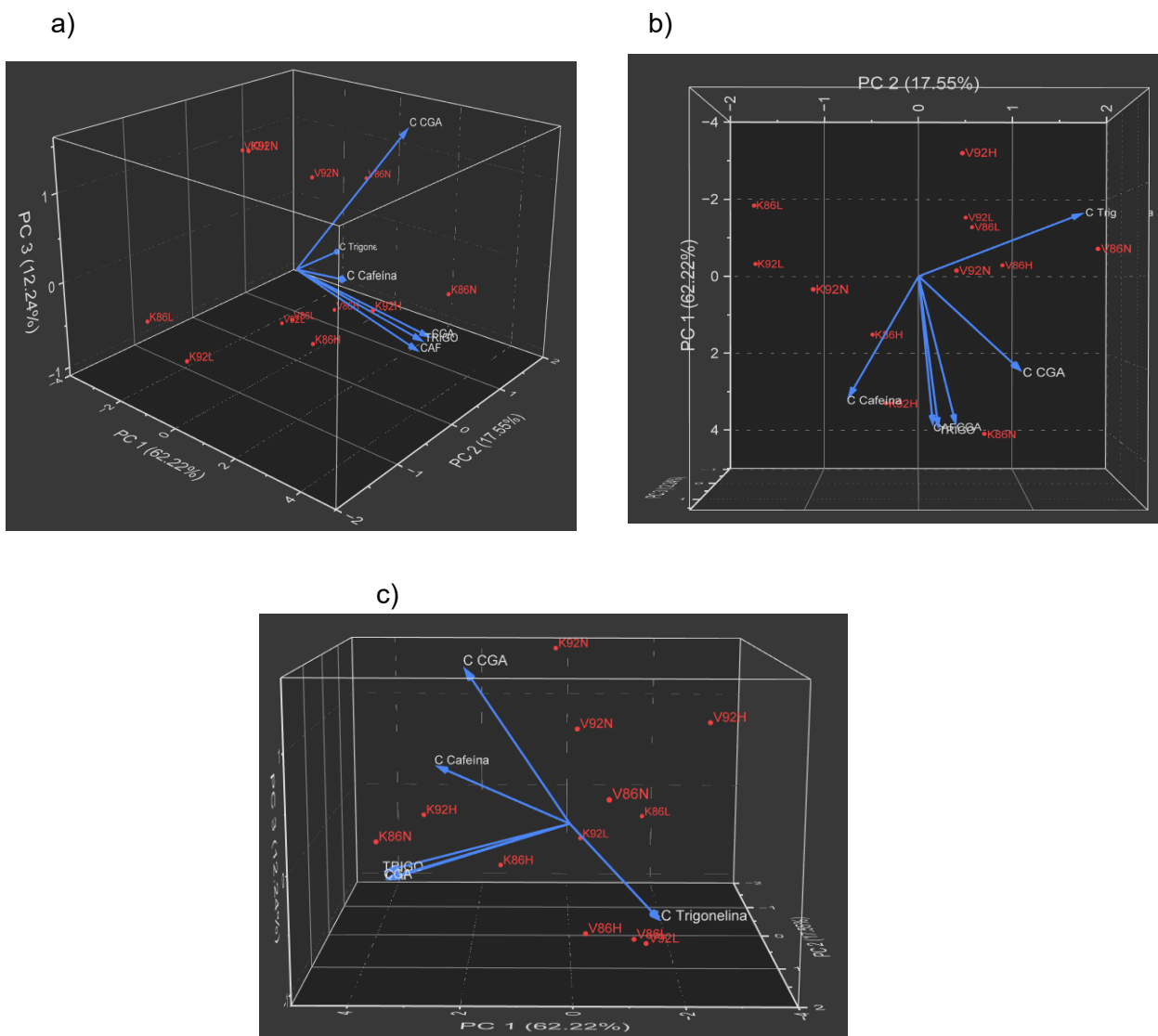


Figura 12. a), b) y c) gráficos en 3D del PCA para café tostado desde diferentes perspectivas

El primer punto para destacar en el gráfico es que los vectores que corresponden a las absorbancias leídas en los espectros de FTIR con nomenclatura CGA, CAF y TRIGO están prácticamente juntos y los ángulos entre ellos son muy pequeños lo que quiere decir que existe una alta correlación entre las variables y los cambios entre una y otra no representan grandes diferencias entre las muestras.

Para el caso de la trigonelina, al analizar el gráfico se observó que la muestra o extracto que se diferencia de los demás por un mayor contenido de este compuesto es el obtenido con granos naturales a 86°C y utilizando V60 como

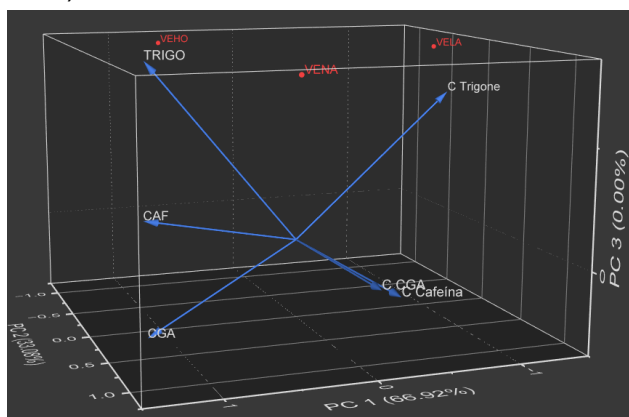
método de extracción (muestra V86N). Resulta interesante que al analizar el gráfico 3D una buena parte de los extractos preparados con V60 se inclinan más hacia el contenido de trigonelina (V86H, V86L y V92L).

Asimismo, se encontró que el extracto caracterizado por un contenido mayor de ácido clorogénico y, por lo tanto, más cercano al vector que representa la concentración medida en HPLC de CGA fue el V92N. En este mismo sentido, el que se puede distinguir y separar por su variabilidad en función del contenido de cafeína es el identificado como K92H. Para muestras preparadas con Kalita, la variabilidad entre ellas es más grande y dependen de más variables como cafeína, CGA y las absorbancias de FTIR, a diferencia de los de V60 que tienden más hacia la trigonelina. Finalmente, las muestras que no se logran agrupar y que tienen correlación negativa entre variables, son las identificadas como K92L y K86L, que son las más alejadas de cualquier vector y por ende son de bajo contenido en todas las características principales.

3.5.2 PCA de café verde

El análisis PCA para extractos de café verde presentó un acumulado del 100% desde la segunda componente; sin embargo, para tener una mayor claridad en la posición de los puntos, este PCA se analizó con un gráfico 3D, en donde se pudo observar gran dispersión entre las 3 muestras de extractos. En este caso, los vectores de concentración de cafeína y ácido clorogénico tienen un ángulo pequeño entre ellos lo cual reflejó una alta correlación entre ellos. El punto identificado como VELA referido al extracto de café verde con beneficiado lavado, se diferencia de los demás puntos por tener un mayor contenido de trigonelina y ser el más cercano al vector. El extracto preparado con granos verdes procesados naturalmente (VENA), se identificó en un punto intermedio entre los vectores que representan la concentración de cafeína y CGA y la absorbancia de trigonelina. Debido a esto, se puede intuir que es el extracto con un contenido medio de cada compuesto. Finalmente, el punto con el perfil más bajo en el contenido de los 3 compuestos es el identificado como VEHO, el cual se encontró en dirección opuesta a cualquiera de los vectores y por lo tanto tiene una correlación negativa.

a)



b)

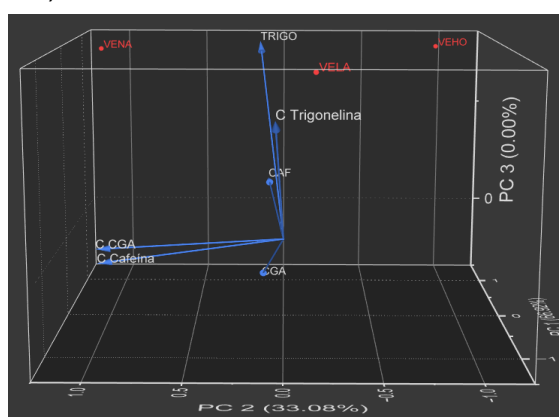


Figura 13. a) y b) gráficos en 3D del PCA para café verde desde diferentes perspectivas

4. CONCLUSIONES

1. El método de extracción si tuvo influencia en el contenido de cafeína y trigonelina en extractos de café de especialidad, independientemente de la temperatura y el tipo de beneficiado con el que fueron procesados los granos. El método con el que se obtiene una mayor concentración de cafeína es con Kalita y, por el contrario, el que presentó mayores valores de trigonelina fue V60. En las pruebas fisicoquímicas, el método de extracción tuvo efectos en el color en sus 3 coordenadas L^* , a^* y b^* con Kalita siendo dominante en las 3 respecto a V60, la misma situación ocurre con los grados Brix, pero el pH se vio influenciado por el V60.
2. El tipo de beneficiado mostró influencia en parámetros como la concentración de ácido clorogénico, en específico, el beneficiado natural de los granos resultó ser el de mayor contenido de CGA. En otros parámetros evaluados como pH, acidez titulable y las coordenadas de color también se observó el efecto del tratamiento post cosecha del café.
3. La temperatura de extracción también tuvo efecto, aunque en menor medida en algunos de los parámetros evaluados como las concentraciones de cafeína y trigonelina, con mayor contenido de cafeína al extraerse a 92°C y mayor contenido de trigonelina a los 86°C, para las 3 coordenadas de color la temperatura de extracción predominante fueron los 92°C.

5. TRABAJO FUTURO

De acuerdo con los resultados obtenidos en este proyecto y bajo el mismo esquema de trabajo con café de especialidad, como posibles trabajos a futuro se visualizan las siguientes propuestas.

1. Incluir el nivel de tostado como variable y otros sistemas de extracción que pueda tener un impacto en la presencia de los 3 compuestos no volátiles analizados, cafeína, trigonelina y ácido clorogénico.
2. Correlacionar los análisis que evalúan la presencia de compuestos no volátiles del café en las 2 técnicas HPLC y FTIR para una posible sustitución de la técnica convencional como HPLC a una técnica emergente como FTIR, con el fin de hacer más rápidos, económicos y confiables estos análisis de detección.
3. Implementar un análisis para la detección de compuestos volátiles en este café de especialidad como cromatografía de gases.
4. Complementar la investigación implementando un análisis sensorial involucrando catas de café con personal *Q grader*, paneles sensoriales o utilizando una nariz electrónica.
5. Comparar con este tipo de análisis cafés mexicanos de otras regiones y estados de país.

6. REFERENCIAS

- Ali, A. H. (2022). High-performance liquid chromatography (HPLC): A review. *Ann. Adv. Chem*, 6, 010-020.
- Asbaghi, O., Sadeghian, M., Rahmani, S., Mardani, M., Khodadost, M., Maleki, V., ... & Sadeghi, O. (2020). The effect of green coffee extract supplementation on anthropometric measures in adults: A comprehensive systematic review and dose-response meta-analysis of randomized clinical trials. *Complementary therapies in medicine*, 51, 102424.
- Aswathi, K. N., & Murthy, P. S. (2024). Pulped natural/honey coffee process: An innovative approach. *Food and Humanity*, 2, 100287.
- Aswathi, K. N., Shirke, A., Praveen, A., Chaudhari, S. R., & Murthy, P. S. (2023). Pulped natural/honey robusta coffee fermentation metabolites, physico-chemical and sensory profiles. *Food Chemistry*, 429, 136897.
- Awwad, S., Issa, R., Alnsour, L., Albals, D., & Al-Momani, I. (2021). Quantification of caffeine and chlorogenic acid in green and roasted coffee samples using HPLC-DAD and evaluation of the effect of degree of roasting on their levels. *Molecules*, 26(24), 7502.
- Bastian, F., Hutabarat, O. S., Dirpan, A., Nainu, F., Harapan, H., Emran, T. B., & Simal-Gandara, J. (2021). From plantation to cup: Changes in bioactive compounds during coffee processing. *Foods*, 10(11), 2827.
- Browning, D. (2019, agosto 12). *Using Technology to Help Smallholder Farmers* [Episodio de podcast]. En P. Giuliano (Anfitrión), *Re:co Podcast* (Temporada 2, Episodio 5). Specialty Coffee Association. <https://sca.coffee/sca-news/podcast/64/reco-podcast-david-browning-on-using-technology-to-help-smallholder-farmers-s2-ep-5>
- Buridan, F. (2015). Caffeine in coffee. In *Coffee in health and disease prevention* (pp. 201-207). Academic Press.
- Café Infiltrado. (2024, 18 de octubre). *La historia de la V60: Un ícono del café de especialidad*. Recuperado el 20 de abril de 2025, de <https://cafeinfiltrado.com/blogs/noticias/la-historia-de-la-v60?srsId=AfmBOopl8xtRs1rvLpNC9lmtl1zMV8RMSG2NoCPmhZVdaFTWIYGyZAFW>
- Campos, A. D. S. N., Satolo, E. G., Mac-Lean, P. A. B., & Júnior, S. S. B. (2021). Economic sustainability analysis of the specialty coffee farmers in Garça/SP. *Coffee Science-ISSN 1984-3909*, 16, e161993-e161993.
- Cardoso, W. S., Dias, S. R., Coelho, V. S., Pereira, L. L., Fioresi, D. B., & de Abreu Pinheiro, F. (2023). Maillard reaction precursors and arabica coffee (*Coffea arabica* L.) beverage quality. *Food and Humanity*, 1, 1-7.
- Centro de Comercio Internacional (2022). *La Guía del Café*, Cuarta edición. ITC (Ginebra).
- Cohen, M. (2021). *Coffee for Dummies*. John Wiley & Sons.

Cordoba, N., Fernandez-Alduenda, M., Moreno, F. L., & Ruiz, Y. (2020). Coffee extraction: A review of parameters and their influence on the physicochemical characteristics and flavour of coffee brews. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 45-60.

Cordoba, N., Pataquiva, L., Osorio, C., Moreno, F. L. M., & Ruiz, R. Y. (2019). Effect of grinding, extraction time and type of coffee on the physicochemical and flavour characteristics of cold brew coffee. *Scientific reports*, 9(1), 8440.

Cortés-Macías, E. T., López, C. F., Gentile, P., Girón-Hernández, J., & López, A. F. (2022). Impact of post-harvest treatments on physicochemical and sensory characteristics of coffee beans in Huila, Colombia. *Postharvest Biology and Technology*, 187, 111852.

Costa, B. D. R. (2020). Brazilian specialty coffee scenario. In *Coffee consumption and industry strategies in Brazil* (pp. 51-64). Woodhead Publishing.

Cwiková, O., Komprda, T., Šottníková, V., Svoboda, Z., Simonová, J., Slováček, J., & Jůzl, M. (2022). Effects of different processing methods of coffee arabica on colour, acrylamide, caffeine, chlorogenic acid, and polyphenol content. *Foods*, 11(20), 3295.

Das, S. (2021). Post-harvest processing of coffee: an overview.

de Melo Pereira, G. V., de Carvalho Neto, D. P., Júnior, A. I. M., Vásquez, Z. S., Medeiros, A. B., Vandenberghe, L. P., & Soccol, C. R. (2019). Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans—A review. *Food chemistry*, 272, 441-452.

de Vasconcelos Teixeira, L. (2020). The consumption of experiences in specialty coffee shops. In *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil* (pp. 275-295). Woodhead Publishing.

dePaula, J., & Farah, A. (2019). Caffeine consumption through coffee: Content in the beverage, metabolism, health benefits and risks. *Beverages*, 5(2), 37.

Diviš, P., Pořízka, J., & Kříkala, J. (2019). The effect of coffee beans roasting on its chemical composition. *Slovak Journal of Food Sciences/Potravinárstvo*, 13(1).

Doepker, C., Franke, K., Myers, E., Goldberger, J. J., Lieberman, H. R., O'Brien, C., ... & Wikoff, D. (2018). Key findings and implications of a recent systematic review of the potential adverse effects of caffeine consumption in healthy adults, pregnant women, adolescents, and children. *Nutrients*, 10(10), 1536.

Duarte, G. S., Pereira, A. A., & Farah, A. (2010). Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. *Food Chemistry*, 118(3), 851-855.

Easto, J., & Willhoff, A. (2017). *Craft Coffee: A Manual*. Agate Publishing.

Egger, S., & Orr, R. A. (2015). *The home barista: How to bring out the best in every coffee bean*. The Experiment.

Enríquez, J. P., Retes-Cálix, R. F., & Vásquez-Reyes, E. F. (2020). Importancia, genética y evolución del café en Honduras y el mundo. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 9(3), 149-155.

Farah, A., & dos Santos, T. F. (2015). The coffee plant and beans: An introduction. In *Coffee in health and disease prevention* (pp. 5-10). Academic Press.

Eka, L., Ngatinem, N., Rahayuningtyas, A., & Ulum, B. (2025). Determination of Caffeine Content at the Difference in Arabica and Robusta Coffee Roast Levels Using HPLC. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 158, p. 04011). EDP Sciences.

Fernandes, F. (2019). Roasting.

Ferreira, T., Shuler, J., Guimarães, R., & Farah, A. (2019). Introduction to coffee plant and genetics.

Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2011). Potential uses of fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) in food processing and engineering. *Food Eng*, 16, 211-227.

Folmer, B. (Ed.). (2017). *The craft and science of coffee*. Academic Press.

Halagarda, M., & Obrok, P. (2023). Influence of post-harvest processing on functional properties of coffee (*Coffea arabica* L.). *Molecules*, 28(21), 7386.

Herrera, J. C., & Lambot, C. (2017). The coffee tree—Genetic diversity and origin. In *The craft and science of coffee* (pp. 1-16). Academic Press.

Juárez González, T., Maldonado Astudillo, Y. I., González Mateos, R., Ramírez Sucre, M. O., Álvarez Fitz, P., & Salazar, R. (2021). Caracterización fisicoquímica y sensorial de café de la montaña de Guerrero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(6), 1057-1069.

Klingel, T., Kremer, J. I., Gottstein, V., Rajcic de Rezende, T., Schwarz, S., & Lachenmeier, D. W. (2020). A review of coffee by-products including leaf, flower, cherry, husk, silver skin, and spent grounds as novel foods within the European Union. *Foods*, 9(5), 665.

Konstantinidis, N., Franke, H., Schwarz, S., & Lachenmeier, D. W. (2023). Risk assessment of trigonelline in coffee and coffee by-products. *Molecules*, 28(8), 3460.

Lambot, C., Herrera, J. C., Bertrand, B., Sadeghian, S., Benavides, P., & Gaitan, A. (2017). Cultivating coffee quality—Terroir and agro-ecosystem. In *The craft and science of coffee* (pp. 17-49). Academic Press.

Lee, K. S. (2021). Expressionist view of culinary creativity: A culinary theory exercised with specialty coffee. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 23, 100311.

Li, J. (2022). What Determines Coffee Aroma and Flavor?. *Berkeley Scientific Journal*, 26(2).

Liang, N., Lu, X., Hu, Y., & Kitts, D. D. (2016). Application of attenuated total reflectance—Fourier transformed infrared (ATR-FTIR) spectroscopy to determine the chlorogenic acid isomer profile and antioxidant capacity of coffee beans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(3), 681-689.

Liang, J., Chan, K. C., & Ristenpart, W. D. (2021). An equilibrium desorption model for the strength and extraction yield of full immersion brewed coffee. *Scientific reports*, 11(1), 6904.

Lidya, B., Wildiani, I. R., Ramadhan, M. Z., & Hariyadi, T. (2024). The Effect of Fermentation Time in Full Wash and Honey Processing on Arabica Coffee Characteristics. *Fluida*, 17(2), 78-84.

Luna González, A., Luna Méndez, N., & Ortega Hernández, A. (2022). Factores explicativos del pago por café de especialidad, el caso del “Certamen Cup of Excellence-México”.

Lyman, D. J., Benck, R., Dell, S., Merle, S., & Murray-Wijelath, J. (2003). FTIR-ATR analysis of brewed coffee: effect of roasting conditions. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(11), 3268-3272.

Melese, Y. Y., & Kolech, S. A. (2021). Coffee (*Coffea arabica* L.): methods, objectives, and future strategies of breeding in Ethiopia. *Sustainability*, 13(19), 10814.

Moldoveanu, S. C., & David, V. (2022). *Essentials in modern HPLC separations*. Elsevier.

Aung Moon, S., Wongsakul, S., Kitazawa, H., & Saengrayap, R. (2024). Influence of Post-Harvest Processing and Drying Techniques on Physicochemical Properties of Thai Arabica Coffee. *AgriEngineering*, 6(3).

Morris, J. (2019). *Coffee: A Global History*. Reaktion Books.

Mudgil, D., & Barak, S. (2018). *Beverages: Processing and technology*. Scientific Publishers.

Munyendo, L. M., Njoroge, D. M., Owaga, E. E., & Mugendi, B. (2021). Coffee phytochemicals and post-harvest handling—A complex and delicate balance. *Journal of food composition and analysis*, 102, 103995.

Muzykiewicz-Szymańska, A., Nowak, A., Wira, D., & Klimowicz, A. (2021). The effect of brewing process parameters on antioxidant activity and caffeine content in infusions of roasted and unroasted Arabica coffee beans originated from different countries. *Molecules*, 26(12), 3681.

Nugrahini, A. D., Ishida, M., Nakagawa, T., Nishi, K., & Sugahara, T. (2020). Trigonelline: An alkaloid with anti-degranulation properties. *Molecular Immunology*, 118, 201-209.

Pereira, J. A., Casado, N., Porto-Figueira, P., & Câmara, J. S. (2022). The potential of microextraction techniques for the analysis of bioactive compounds in food. *Frontiers in Nutrition*, 9, 825519.

Pereira, L. L., Debona, D. G., Pinheiro, P. F., de Oliveira, G. F., ten Caten, C. S., Moksunova, V., ... & Yamamoto, H. (2020). Roasting process. In *Quality determinants in coffee production* (pp. 303-372). Cham: Springer International Publishing.

Pinheiro, P. F., Pinheiro, C. A., Osório, V. M., & Pereira, L. L. (2020). Chemical constituents of coffee. In *Quality determinants in coffee production* (pp. 209-254). Cham: Springer International Publishing.

Poisson, L., Blank, I., Dunkel, A., & Hofmann, T. (2017). The chemistry of roasting—Decoding flavor formation. In *The craft and science of coffee* (pp. 273-309). Academic Press.

Poisson, L., Pittet, J., Schaerer, A., Mestdagh, F., & Davidek, T. (2020). Quantitative validation of the In-Bean approach in coffee roasting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(17), 4732-4742.

Rao, N. Z., Fuller, M., & Grim, M. D. (2020). Physiochemical characteristics of hot and cold brew coffee chemistry: The effects of roast level and brewing temperature on compound extraction. *Foods*, 9(7), 902.

Roales-Nieto, J. G., San Pedro, E. M., Luciano, A. G., & Coronado, J. L. B. (2019). Efectos del cambio a café filtrado sobre los niveles séricos de colesterol. *International Journal of Psychology and Psychological Therapy*, 19(3), 291-310.

Rodrigues, C., Maia, R., Ribeirinho, M., Hildebrandt, P., Gautz, L., Prohaska, T., & Máguas, C. (2013). Coffee. In *Comprehensive Analytical Chemistry* (Vol. 60, pp. 573-598). Elsevier.

Rodriguez, Y. F., Guzman, N. G., & Hernandez, J. G. (2020). Effect of the postharvest processing method on the biochemical composition and sensory analysis of arabica coffee. *Engenharia Agrícola*, 40, 177-183.

Rojas-González, A., Figueroa-Hernández, C. Y., González-Rios, O., Suárez-Quiroz, M. L., González-Amaro, R. M., Hernández-Estrada, Z. J., & Rayas-Duarte, P. (2022). Coffee chlorogenic acids incorporation for bioactivity enhancement of foods: A review. *Molecules*, 27(11), 3400.

Rusinek, R., Dobrzanski J, B., Gawrysiak-Witulska, M., Siger, A., Zytek, A., Karami, H., ... & Gancarz, M. (2024). Effect of the roasting level on the content of bioactive and aromatic compounds in Arabica coffee beans. *International Agrophysics*, 38(1).

Sanlier, N., Atik, A., & Atik, I. (2019). Consumption of green coffee and the risk of chronic diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(16), 2573-2585.

Sanz-Urbe, J. R., Menon, S. N., Peñuela, A., Oliveros, C., Husson, J., Brando, C., & Rodriguez, A. (2017). Postharvest processing—revealing the green bean. In *The craft and science of coffee* (pp. 51-79). Academic Press.

Schenker, S., & Rothgeb, T. (2017). The roast—Creating the Beans' signature. In *The craft and science of coffee* (pp. 245-271). Academic Press.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024, 15 de agosto). Escenario mensual de productos agroalimentarios: Café cereza, avances a junio de 2024. Dirección de Análisis Estratégico. <https://www.gob.mx/siap>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022, 13 de septiembre). *Escenario mensual de productos agroalimentarios: Café cereza, avances a mayo de 2022*. Dirección de Análisis Estratégico. <https://www.gob.mx/siap>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017–2030. Ciudad de México: SAGARPA. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeaci_n_Agr cola_Nacional_2017-2030_-_parte_uno.pdf

Şemen, S., Mercan, S., Yayla, M., & Açikkol, M. (2017). Elemental composition of green coffee and its contribution to dietary intake. *Food chemistry*, 215, 92-100.

de Sousa e Silva, J., Moreli, A. P., Donzeles, S. M. L., Soares, S. F., & Vitor, D. G. (2020). Harvesting, drying and storage of coffee. In *Quality Determinants In Coffee Production* (pp. 1-64). Cham: Springer International Publishing.

Specialty Coffee Mag (s. f.). Diferencias y similitudes entre la V60 y la Kalita. Specialty Coffee Magazine. Recuperado de <https://www.specialtycoffeemag.com/diferencias-y-similitudes-entre-la-v60-y-la-kalita/>

Stanek, N., Zarębska, M., Biłos, Ł., Barabosz, K., Nowakowska-Bogdan, E., Semeniuk, I., ... & Szkutnik, K. (2021). Influence of coffee brewing methods on the chromatographic and spectroscopic profiles, antioxidant and sensory properties. *Scientific reports*, 11(1), 21377.

Tieghi, H., de Almeida Pereira, L., Viana, G. S., Katchborian-Neto, A., Santana, D. B., Mincato, R. L., ... & Bueno, P. C. P. (2024). Effects of geographical origin and post-harvesting processing on the bioactive compounds and sensory quality of Brazilian specialty coffee beans. *Food Research International*, 186, 114346.

Vidushi, Y., Meenakshi, B., & Bharkatiya, M. (2017). A review on HPLC method development and validation. *Res J Life Sci, Bioinform, Pharm Chem Sci*, 2(6), 178.

Wale, K., Tolessa, K., Atlabachew, M., Mehari, B., Alemayehu, M., Mengistu, D. A., & Kerisew, B. (2024). Level of caffeine, trigonelline and chlorogenic acids in green coffee (*Coffea arabica* L.) beans from Amhara region, Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101082.

Wang, L., Pan, X., Jiang, L., Chu, Y., Gao, S., Jiang, X., ... & Peng, C. (2022). The biological activity mechanism of chlorogenic acid and its applications in food industry: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 943911.

Wei, F., & Tanokura, M. (2015). Chemical changes in the components of coffee beans during roasting. In *Coffee in health and disease prevention* (pp. 83-91). Academic Press.

Worku, M., Astatkie, T., & Boeckx, P. (2023). Shade and postharvest processing effects on arabica coffee quality and biochemical composition in lowland and midland coffee-growing areas of southwestern Ethiopia. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 105027.

Yulianti, Y., Adawiyah, D. R., Herawati, D., Indrasti, D., & Andarwulan, N. (2023). Detection of Markers in Green Beans and Roasted Beans of Kalosi-Enrekang Arabica Coffee with Different Postharvest Processing Using LC-MS/MS. *International Journal of Food Science*, 2023(1), 6696808.

Zapata, A. M. O., Arango, F. O. D., & Rojano, B. A. (2019). The effect of gravity-drip filtration methods on the chemical and sensorial properties of coffee (*Coffea arabica* L. var. Castillo).

7. ANEXOS

Anexo I Concentraciones de Cafeína, Trigonelina y CGA y pruebas físicoquímicas

- Café tostado

Extractos de café tostado (ppm)			
Muestra	C Cafeína	C Trigonelina	C CGA
K92N	733.49	983.69	877.89
K86N	746.70	1202.32	890.65
K92L	723.32	978.59	738.63
K86L	712.57	1012.85	730.82
K92H	752.09	1111.80	849.83
K86H	718.79	1039.52	810.08
V92N	709.27	1150.74	883.79
V86N	698.82	1402.96	889.01
V92L	708.57	1429.51	745.18
V86L	714.19	1449.16	750.14
V92H	719.20	1430.17	821.34
V86H	701.10	1334.01	798.50

Extractos de café tostado						
Muestra	L	a	b	Brix	Ph	Acidez titulable
K92N	6.42	0.22	6.49	3.00	4.73	2.26
K86N	4.65	-0.22	4.27	3.27	4.73	2.52
K92L	5.00	0.91	4.90	3.13	4.81	2.09
K86L	5.00	-0.21	5.02	3.10	4.82	2.02
K92H	3.77	0.000001	3.58	3.20	4.67	2.79
K86H	4.96	0.88	5.02	2.93	4.67	2.53
V92N	6.46	0.18	6.59	1.77	4.79	2.31
V86N	3.85	-0.40	3.38	1.80	4.73	2.48
V92L	4.67	-0.01	4.27	1.80	4.79	2.11
V86L	3.96	-0.16	3.38	1.83	4.80	2.16
V92H	3.68	-0.20	3.40	1.83	4.68	2.69
V86H	5.01	0.24	4.85	1.93	4.70	2.52

- Café verde

Extractos de café verde			
Muestra	Con. Cafeína	Con. Trigonelina	Con. CGA
VENA	193.07	189.39	632.43
VELA	189.08	196.29	587.08
VEHO	183.60	187.79	547.94

Anexo II ANOVA con comparación de media de Tukey para concentración de cafeína

Anexo II: ANOVAS EN MINITAB PARA CONCENTRACIÓN DE CAFÉÍNA CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: Con. Cafeína versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	3073.88	3073.88	36.54	0
Temperatura	1	482.2	482.2	5.73	0.034
Beneficiado	2	323.99	161.99	1.93	0.188
Méto*Temp	1	10.46	10.46	0.12	0.73
Méto*Bene	2	890.46	445.23	5.29	0.022
Temp*Bene	2	856.23	428.11	5.09	0.025
Me*Te*Be	2	518.82	259.41	3.08	0.083
Error	12	1009.45	84.12		
Total	23	7165.49			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
9.17174	85.91%	73.00%	43.65%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Método	Temperatura	Beneficiado	Metodo*Temperatura	Método*Beneficiado
Temperatura*Beneficiado	Método*Temperatura*Beneficiado			

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Cafeína, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
1	12	731.16	A
2	12	708.52	B

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Cafeína, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
92	12	724.32	A
86	12	715.36	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Cafeína, Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping
3	8	722.79	A
1	8	722.07	A
2	8	714.66	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Cafeína, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping		
1	92	6	736.3	A		
1	86	6	726.01	A	B	
2	92	6	712.34		B	C
2	86	6	704.7			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Cafeína, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	1	4	740.09	A		
1	3	4	735.44	A	B	
1	2	4	717.94		B	C
2	2	4	711.38			C
2	3	4	710.14			C
2	1	4	704.04			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Cafeína, Term = Temperatura*Beneficiado

Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping	
92	3	4	735.64	A	
86	1	4	722.75	A	B
92	1	4	721.38	A	B
92	2	4	715.94	A	B
86	2	4	713.38		B
86	3	4	709.94		B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Cafeína, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	92	3	2	752.094	A		
1	86	1	2	746.696	A	B	
1	92	1	2	733.492	A	B	C
1	92	2	2	723.321	A	B	C
2	92	3	2	719.199	A	B	C
1	86	3	2	718.786	A	B	C
2	86	2	2	714.19		B	C
1	86	2	2	712.57		B	C
2	92	1	2	709.271			C
2	92	2	2	708.574			C
2	86	3	2	701.098			C
2	86	1	2	698.823			C

Para la concentración de cafeína presentan diferencias significativas en 2 variables: método y temperatura, por lo que se hicieron nuevos ANOVA para cada beneficiado considerando únicamente esas dos variables,

Beneficiado natural					
Método*	*Temperatura	N	Mean	Grouping	
1	86	2	746.69	A	
1	92	2	733.49	A	B
2	92	2	709.27	A	B
2	86	2	698.82		B

Beneficiado lavado				
Método*	*Temperatura	N	Mean	Grouping
1	92	2	723.32	A
2	86	2	714.19	A
1	86	2	712.57	A
2	92	2	708.57	A

Beneficiado honey					
Método*	*Temperatura	N	Mean	Grouping	
1	92	2	752.09	A	
2	92	2	719.19	A	B
1	86	2	718.786	A	B
2	86	2	701.09		B

Anexo III ANOVA con comparación de media de Tukey para concentración de trigonelina

Anexo III: ANOVAS EN MINITAB PARA CONCENTRACIÓN DE TRIGONELINA CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: Con. Trigonelina versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	581423	581423	306.96	0
Temperatura	1	21159	21159	11.17	0.006
Beneficiado	2	8327	4163	2.2	0.154
Méto*Temp	1	4	4	0	0.964
Méto*Bene	2	67552	33776	17.83	0
Temp*Bene	2	105327	52664	27.8	0
Me*Te*Be	2	952	476	0.25	0.782
Error	12	22730	1894		
Total	23	807473			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
43.5219	97.19%	94.60%	88.74%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Método	Temperatura	Beneficiado	Método*Temperatura	Método*Beneficiado
Temperatura*Beneficiado	Método*Temperatura*Beneficiado			

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Trigonelina, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
2	12	1366.09	A
1	12	1054.8	B

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Trigonelina, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
86	12	1240.14	A
92	12	1180.75	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Trigonelina, Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping
3	8	1228.87	A
2	8	1217.53	A
1	8	1184.93	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Trigonelina, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping	
2	86	6	1395.37	A	
2	92	6	1336.81	A	
1	86	6	1084.9		B
1	92	6	1024.7		B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Trigonelina, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
2	2	4	1439.33	A		
2	3	4	1382.09	A		
2	1	4	1276.85		B	
1	1	4	1093.01			C
1	3	4	1075.66			C
1	2	4	995.72			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Trigonelina, Term = Temperatura*Beneficiado

Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
86	1	4	1302.64	A		
92	3	4	1270.98	A	B	
86	2	4	1231	A	B	
92	2	4	1204.05	A	B	
86	3	4	1186.76		B	
92	1	4	1067.22			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. Trigonelina, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
2	86	2	2	1449.16	A			
2	92	3	2	1430.17	A			
2	92	2	2	1429.51	A			
2	86	1	2	1402.96	A			
2	86	3	2	1334.01	A	B		
1	86	1	2	1202.32		B	C	
2	92	1	2	1150.74			C	D
1	92	3	2	1111.8			C	D
1	86	3	2	1039.52			C	D
1	86	2	2	1012.85				D
1	92	1	2	983.69				D
1	92	2	2	978.59				D

Para la concentración de cafeína presentan diferencias significativas en 2 variables: método y temperatura, por lo que se hicieron nuevos ANOVA para cada beneficiado considerando únicamente esas dos variables

Beneficiado natural					
Método*	*Temperatura	N	Mean	Grouping	
2	86	2	1402.96	A	
1	86	2	1202.32	A	B
2	92	2	1150.74	A	B
1	86	2	983.69		B

Beneficiado lavado					
Método*	*Temperatura	N	Mean	Grouping	
2	86	2	1449.16	A	
2	92	2	1429.51	A	
1	86	2	1012.85		B
1	92	2	978.59		B

Beneficiado natural					
Método*	*Temperatura	N	Mean	Grouping	
2	92	2	1430.17	A	
2	86	2	1334.01	A	
1	92	2	1111.8		B
1	86	2	1039.52		B

Anexo IV ANOVA con comparación de media de Tukey para concentración de ácido clorogénico

Anexo IV: ANOVAS EN MINITAB PARA CONCENTRACIÓN DE CGA CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: Con. CGA versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	16.5	16.5	0.16	0.697
Temperatura	1	375.4	375.4	3.62	0.081
Beneficiado	2	83349.1	41674.6	401.5	0
Méto*Temp	1	81.7	81.7	0.79	0.392
Méto*Bene	2	1129.7	564.8	5.44	0.021
Temp*Bene	2	1748.3	874.2	8.42	0.005
Me*Te*Be	2	171.2	85.6	0.82	0.462
Error	12	1245.6	103.8		
Total	23	88117.4			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
10.188	98.59%	97.29%	94.35%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Método	Temperatura	Beneficiado	Método*Temperatura
Temperatura*Beneficiado	Método*Temperatura*Beneficiado		

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. CGA, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
1	12	816.31	A
2	12	814.66	A

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. CGA, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
92	12	819.44	A
86	12	811.53	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. CGA, Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	8	885.33	A		
3	8	819.93		B	
2	8	741.19			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. CGA, Term = Método*Temperatura

Método*	Temperatura	N	Mean	Grouping
1	92	6	822.11	A
2	92	6	816.77	A
2	86	6	812.55	A
1	86	6	810.51	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. CGA, Term = Método*Beneficiado

Método*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
2	1	4	886.4	A		
1	1	4	884.27	A		
1	3	4	829.95		B	
2	3	4	809.92		B	
2	2	4	747.65			C
1	2	4	734.72			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. CGA, Term = Temperatura*Beneficiado

Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
86	1	4	889.82	A			
92	1	4	880.84	A			
92	3	4	835.58		B		
86	3	4	804.29			C	
92	2	4	741.9				D
86	2	4	740.48				D

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Con. CGA, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping				
1	86	1	2	890.64	A				
2	86	1	2	889.01	A	B			
2	92	1	2	883.79	A	B			
1	92	1	2	877.89	A	B			
1	92	3	2	849.83		B	C		
2	92	3	2	821.33			C	D	
1	86	3	2	810.08			C	D	
2	86	3	2	798.5				D	
2	86	2	2	750.13					E
2	92	2	2	745.17					E
1	92	2	2	738.63					E
1	86	2	2	730.82					E

Anexo V ANOVA con comparación de media de Tukey para Coordenada L*

- Luminosidad

Anexo V: ANOVAS EN MINITAB PARA L(COLOR) EN CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: L versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	1.1736	1.17361	189.46	0
Temperatura	1	1.6384	1.6384	264.5	0
Beneficiado	2	6.1918	3.09588	499.78	0
Méto*Temp	1	0.4947	0.49468	79.86	0
Méto*Bene	2	0.6678	0.33388	53.9	0
Temp*Bene	2	17.8802	8.9401	1443.24	0
Me*Te*Be	2	0.4336	0.21681	35	0
Error	24	0.1487	0.00619		
Total	35	28.6287			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
0.0787048	99.48%	99.24%	98.83%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Método	Temperatura	Beneficiado	Método*Temperatura
Temperatura*Beneficiado		Método*Temperatura*Beneficiado	

Tukey Pairwise Comparisons: Response = L, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
1	18	4.96	A
2	18	4.6	B

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = L, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
92	18	4.99	A
86	18	4.57	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = L Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	12	5.34	A		
2	12	4.65		B	
3	12	4.35			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = L, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping		
1	92	9	5.06	A		
2	92	9	4.93		B	
1	86	9	4.87		B	
2	86	9	4.27			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = L, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
1	1	6	5.53	A			
2	1	6	5.15		B		
1	2	6	5.001			C	
1	3	6	4.36				D
2	3	6	4.34				D
2	2	6	4.31				D

Tukey Pairwise Comparisons: Response = L, Term = Temperatura*Beneficiado

Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping					
92	1	6	6.44	A					
86	3	6	4.98		B				
92	2	6	4.83			C			
86	2	6	4.48				D		
86	1	6	4.25					E	
92	3	6	3.72						F

Tukey Pairwise Comparisons: Response = L, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping				
2	92	1	3	6.46	A				
1	92	1	3	6.41	A				
2	86	3	3	5.01		B			
1	86	2	3	5.003		B			
1	92	2	3	5		B			
1	86	3	3	4.95		B			
2	92	2	3	4.66			C		
1	86	1	3	4.65			C		
2	86	2	3	3.96				D	
2	86	1	3	3.85				D	E
1	92	3	3	3.77				D	E
2	92	3	3	3.67					E

Anexo VI ANOVA con comparación de media de Tukey para Coordenada a*

- Dimensión de color entre rojo y verde

Anexo VI: ANOVAS EN MINITAB PARA COORDENADA a EN CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: a versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	0.62082	0.62082	115.5	0
Temperatura	1	0.1536	0.1536	28.58	0
Beneficiado	2	0.33506	0.16753	31.17	0
Méto*Temp	1	0.02282	0.02282	4.24	0.062
Méto*Bene	2	0.13451	0.06725	12.51	0.001
Temp*Bene	2	2.02118	1.01059	188.02	0
Me*Te*Be	2	0.55306	0.27653	51.45	0
Error	12	0.0645	0.00538		
Total	23	3.90553			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
0.0733144	98.35%	96.83%	93.39%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Temperatura	Beneficiado	Método*Temperatura
Temperatura*Beneficiado	Método*Temperatura*Beneficiado	

Tukey Pairwise Comparisons: Response = a, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
1	12	0.26	A
2	12	-0.05	B

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = a, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
92	12	0.018	A
86	12	0.023	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = a Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping
3	8	0.22	A
2	8	0.13	A
1	8	-0.05	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = a, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping		
1	92	6	0.37	A		
1	86	6	0.15		B	
2	92	6	-0.008			C
2	86	6	-0.106			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = a, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	3	4	0.44	A		
1	2	4	0.35	A		
2	3	4	0.017			B
1	1	4	0.000001			B
2	2	4	-0.08			B
2	1	4	-0.11			B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = a, Term = Temperatura*Beneficiado

Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
86	3	4	0.55	A			
92	2	4	0.45	A			
92	1	4	0.19		B		
92	3	4	-0.1			C	
86	2	4	-0.18			C	D
86	1	4	-0.307				D

Tukey Pairwise Comparisons: Response = a, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
1	92	2	2	0.91	A			
1	86	3	2	0.88	A			
2	86	3	2	0.23		B		
1	92	1	2	0.21		B		
2	92	1	2	0.18		B		
1	92	3	2	-0.000001		B	C	
2	92	2	2	-0.005		B	C	
2	86	2	2	-0.155			C	D
2	92	3	2	-0.2			C	D
1	86	2	2	-0.205			C	D
1	86	1	2	-0.215			C	D
2	86	1	2	-0.4				D

Anexo VII ANOVA con comparación de media de Tukey para Coordenada b*

- Dimensión de color entre amarillo y azul

Anexo VII: ANOVAS EN MINITAB PARA COORDENADA b* EN CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: b versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	2.9241	2.9141	69.53	0
Temperatura	1	2.7556	2.7556	65.53	0
Beneficiado	2	6.4095	3.2048	76.21	0
Méto*Temp	1	0.9801	0.9801	23.31	0
Méto*Bene	2	1.5125	0.7562	17.98	0
Temp*Bene	2	26.0651	13.0326	309.91	0
Me*Te*Be	2	0.5151	0.2576	6.13	0.007
Error	24	1.0093	0.0421		
Total	35	42.1713			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
0.205068	97.61%	96.51%	94.62%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Temperatura	Beneficiado	Método*Temperatura
Temperatura*Beneficiado	Método*Temperatura*Beneficiado	

Tukey Pairwise Comparisons: Response = b, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
1	18	4.88056	A
2	18	4.31056	B

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = b, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
92	18	4.87	A
86	18	4.31	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = b Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping
1	12	5.18	A
2	12	4.39	B
3	12	4.21	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = b, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping
1	92	9	4.99	A
1	86	9	4.76	A
2	92	9	4.75	A
2	86	9	3.85	B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = b, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping
1	1	6	5.38	A
2	1	6	4.98	B
1	2	6	4.95	B
1	3	6	4.3	C
2	3	6	4.125	C
2	2	6	3.82	D

Tukey Pairwise Comparisons: Response = b, Term = Temperatura*Beneficiado

Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping
92	1	6	6.54	A
86	3	6	4.93	B
92	2	6	4.58	B
86	2	6	4.19	C
86	1	6	3.82	D
92	3	6	3.49	D

Tukey Pairwise Comparisons: Response = b, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
2	92	1	3	6.59	A			
1	92	1	3	6.49	A			
1	86	3	3	5.01		B		
1	86	2	3	5.01		B		
1	92	2	3	4.9		B		
2	86	3	3	4.85		B	C	
1	86	1	3	4.27			C	
2	92	2	3	4.26			C	
1	92	3	3	3.58				D
2	92	3	3	3.4				D
2	86	2	3	3.38				D
2	86	1	3	3.37				D

Anexo VIII ANOVA con comparación de media de Tukey para °Brix
Anexo VIII: ANOVAS EN MINITAB PARA BRUX EN CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: Brix versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	14.6944	14.6944	5290	0
Temperatura	1	0.0044	0.0044	1.6	0.218
Beneficiado	2	0.0017	0.0008	0.3	0.744
Méto*Temp	1	0.01	0.01	3.6	0.07
Méto*Bene	2	0.0439	0.0219	7.9	0.002
Temp*Bene	2	0.0839	0.0419	15.1	0
Me*Te*Be	2	0.135	0.0675	24.3	0
Error	24	0.0667	0.0028		
Total	35	15.04			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
0.0527046	99.56%	99.35%	99.00%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Beneficiado Método*Temperatura

Temperatura*Beneficiado

Método*Temperatura*Beneficiado

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Brix, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
1	18	3.105	A
2	18	1.82	B

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Brix, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
86	18	2.47	A
92	18	2.45	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Brix Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping
3	12	2.47	A
2	12	2.46	A
1	12	2.45	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Brix, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping	
1	92	9	3.11	A	
1	86	9	3.1	A	
2	86	9	1.85		B
2	92	9	1.8		B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Brix, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	1	6	3.13	A		
1	2	6	3.11	A		
1	3	6	3.06	A		
2	3	6	1.88		B	
2	2	6	1.81		B	C
2	1	6	1.78			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Brix, Term = Temperatura*Beneficiado						
Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
86	1	6	2.53	A		
92	3	6	2.51	A	B	
86	2	6	2.46	A	B	C
92	2	6	2.46	A	B	C
86	3	6	2.43		B	C
92	1	6	2.38			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Brix, Term = Método*Temperatura*Beneficiado										
Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping					
1	86	1	3	3.26	A					
1	92	3	3	3.2	A	B				
1	92	2	3	3.13	A	B	C			
1	86	2	3	3.1		B	C			
1	92	1	3	3			C	D		
1	86	3	3	2.93				D		
2	86	3	3	1.93					E	
2	86	2	3	1.83					E	F
2	92	3	3	1.83					E	F
2	86	1	3	1.8					E	F
2	92	2	3	1.8					E	F
2	92	1	3	1.76						F

Anexo IX ANOVA con comparación de media de Tukey para pH

Anexo IX: ANOVAS EN MINITAB PARA PH EN CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: pH versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	0.000625	0.000625	5.11	0.033
Temperatura	1	0.000069	0.000069	0.57	0.458
Beneficiado	2	0.093756	0.046878	383.55	0
Méto*Temp	1	0.000336	0.000336	2.75	0.11
Méto*Bene	2	0.0042	0.0021	17.18	0
Temp*Bene	2	0.003756	0.001878	15.36	0
Me*Te*Be	2	0.001756	0.000878	7.18	0.004
Error	24	0.002933	0.000122		
Total	35	0.107431			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
0.0110554	97.27%	96.02%	93.86%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Beneficiado

Método*Temperatura

Temperatura*Beneficiado

Método*Temperatura*Beneficiado

Tukey Pairwise Comparisons: Response = pH, Term = Método

Método	N	Mean	Grouping
2	18	4.747	A
1	18	4.739	B

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = pH, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
92	18	4.745	A
86	18	4.742	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = pH Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping		
2	12	4.8	A		
1	12	4.74		B	
3	12	4.68			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = pH, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping	
2	92	9	4.752	A	
2	86	9	4.743	A	B
1	86	9	4.741	A	B
1	92	9	4.737		B

Tukey Pairwise Comparisons: Response = pH, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping				
1	2	6	4.816	A				
2	2	6	4.795		B			
2	1	6	4.758			C		
1	1	6	4.73				D	
2	3	6	4.69					E
1	3	6	4.671					E

Tukey Pairwise Comparisons: Response = pH, Term = Temperatura*Beneficiado

Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping				
86	2	6	4.811	A				
92	2	6	4.8	A				
92	1	6	4.76		B			
86	1	6	4.728			C		
86	3	6	4.686					D
92	3	6	4.675					D

Tukey Pairwise Comparisons: Response = pH, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping				
1	86	2	3	4.823	A				
1	92	2	3	4.81	A	B			
2	86	2	3	4.8	A	B			
2	92	2	3	4.79		B			
2	92	1	3	4.786		B			
1	92	1	3	4.73			C		
2	86	1	3	4.73			C	D	
1	86	1	3	4.726			C	D	
2	86	3	3	4.7				D	E
2	92	3	3	4.68					E
1	86	3	3	4.673					E
1	92	3	3	4.67					E

Para los valores de pH presentan diferencias significativas en 2 variables: método y beneficiado, por lo que se hicieron nuevos ANOVA para cada temperatura considerando únicamente esas dos variables.

92°C						
Método*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	2	3	4.81	A		
2	2	3	4.79	A		
2	1	3	4.78	A		
1	1	3	4.73		B	
2	3	3	4.68			C
1	3	3	4.67			C

86°C							
Método*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
1	2	3	4.82	A			
2	2	3	4.8	A			
2	1	3	4.73		B		
1	1	3	4.72		B	C	
2	3	3	4.7			C	D
1	3	3	4.67				D

Anexo X ANOVA con comparación de media de Tukey para Acidez titulable

Anexo X: ANOVAS EN MINITAB PARA ÁCIDEZ TITULABLE EN CAFÉ TOSTADO

General Linear Model: AT versus Método, Temperatura, Beneficiado

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Método	Fixed	2	1,2
Temperatura	Fixed	2	86,92
Beneficiado	Fixed	3	1,2,3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	adj MS	F-Value	P-Value
Método	1	0.065	0.0651	0.2	0.655
Temperatura	1	0.007	0.0072	0.02	0.881
Beneficiado	2	172.904	86.452	271.73	0
Méto*Temp	1	0.354	0.3543	1.11	0.302
Méto*Bene	2	2.777	1.3883	4.36	0.024
Temp*Bene	2	27.13	13.5651	42.64	0
Me*Te*Be	2	1.793	0.8966	2.82	0.08
Error	24	7.636	0.3182		
Total	35	212.667			

Model Summary

s	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)
0.564054	96.41%	94.76%	91.92%

Las siguientes tablas muestran las comparaciones hechas en Minitab mediante un ANOVA de los diferentes factores

Beneficiado**Método*Temperatura****Temperatura*Beneficiado****Método*Temperatura*Beneficiado****Tukey Pairwise Comparisons: Response = AT, Term = Método**

Método	N	Mean	Grouping
2	18	23.7813	A
1	18	23.6963	A

Los medios que no comparten letra son significativamente diferentes

Tukey Pairwise Comparisons: Response = AT, Term = Temperatura

Temperatura	N	Mean	Grouping
92	18	23.7529	A
86	18	23.7246	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = AT, Term = Beneficiado

Beneficiado	N	Mean	Grouping		
3	12	26.3181	A		
1	12	23.9372		B	
2	12	20.961			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = AT, Term = Método*Temperatura

Metodo*	Temperatura	N	Mean	Grouping
2	86	9	23.8663	A
1	92	9	23.8096	A
2	92	9	23.6963	A
1	86	9	23.5829	A

Tukey Pairwise Comparisons: Response = AT, Term = Método*Beneficiado

Metodo*	Beneficiado	N	Mean	Grouping		
1	3	6	26.6158	A		
2	3	6	26.0205	A		
2	1	6	23.9797		B	
1	1	6	23.8947		B	
2	2	6	21.3436			C
1	2	6	20.5783			C

Tukey Pairwise Comparisons: Response = AT, Term = Temperatura*Beneficiado

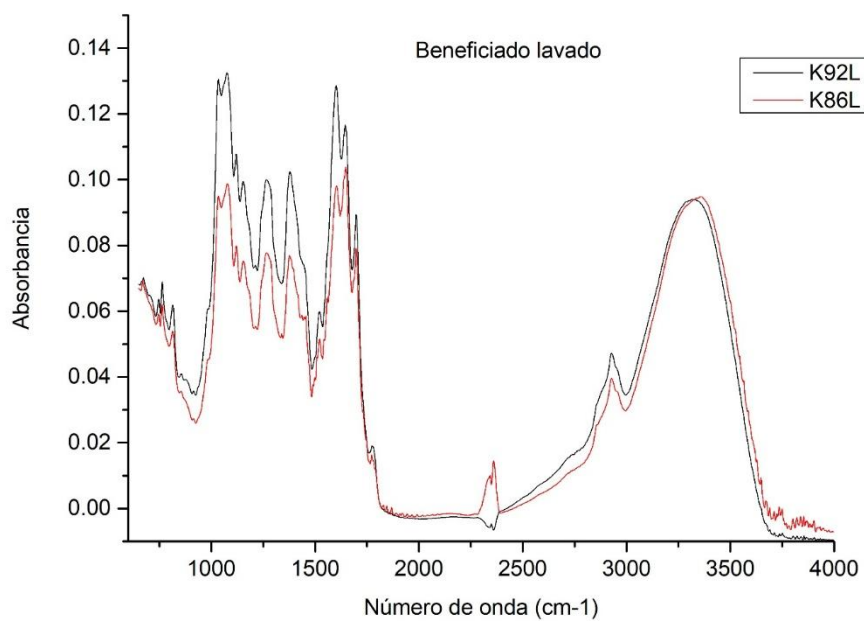
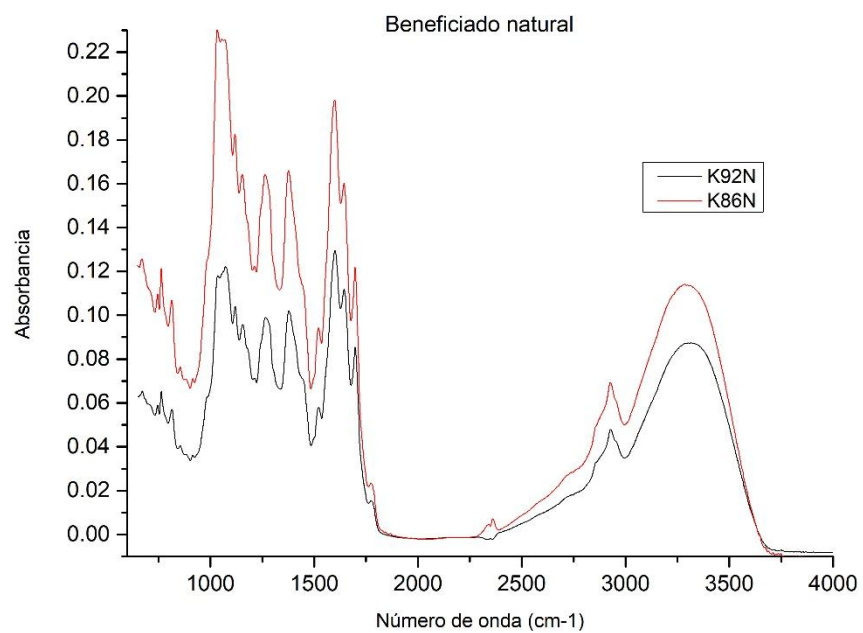
Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping			
92	3	6	27.3811	A			
86	3	6	25.2552		B		
86	1	6	25.0001		B		
92	1	6	22.8743			C	
92	2	6	21.0035				D
86	2	6	20.9185				D

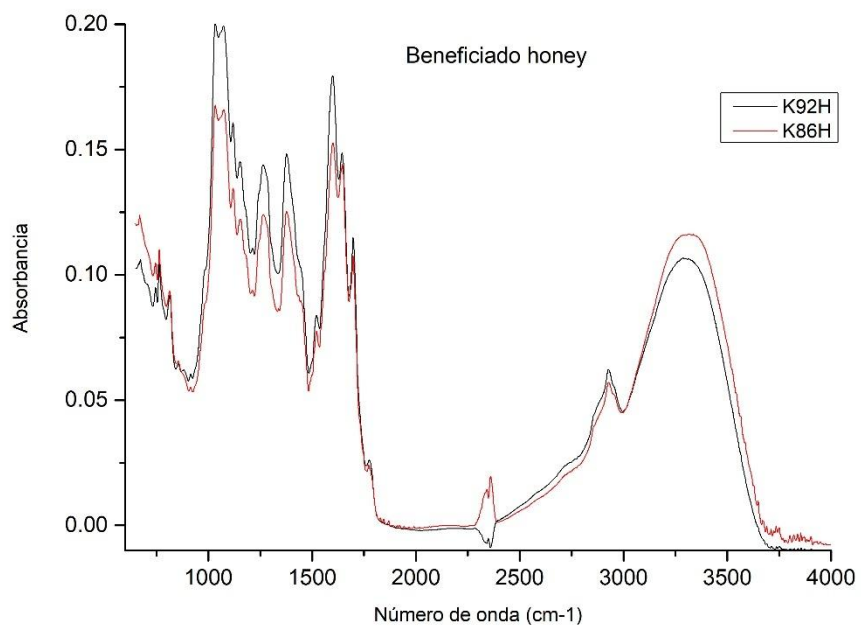
Tukey Pairwise Comparisons: Response = AT, Term = Método*Temperatura*Beneficiado

Método*	Temperatura*	Beneficiado	N	Mean	Grouping				
1	92	3	3	27.8913	A				
2	92	3	3	26.8709	A	B			
1	86	3	3	25.3403		B	C		
2	86	3	3	25.1702			C		
1	86	1	3	25.1702			C		
2	86	1	3	24.83			C		
2	92	1	3	23.1294				D	
1	92	1	3	22.6192				D	E
2	86	2	3	21.5987				D	E
2	92	2	3	21.0885					E
1	92	2	3	20.9185					F
1	86	2	3	20.2382					F

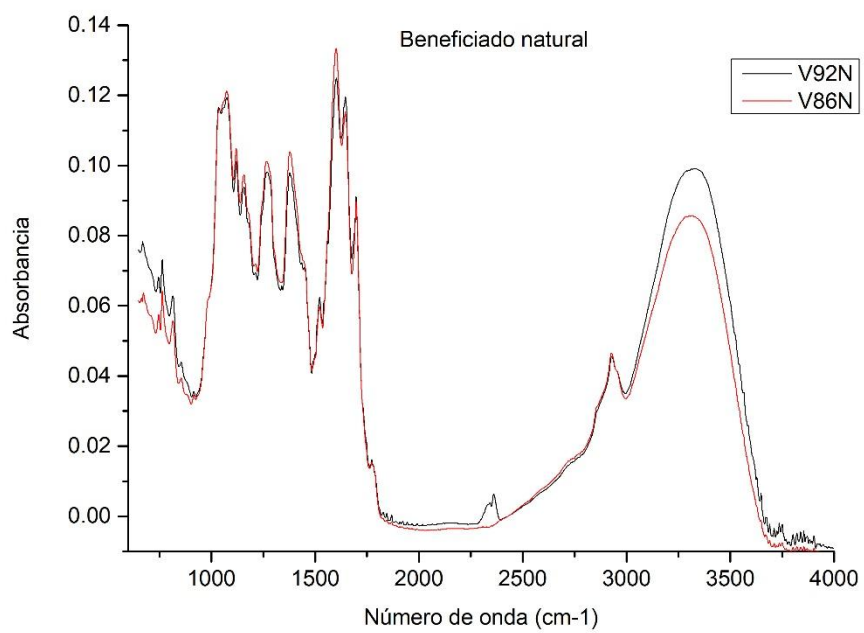
ANEXO XI Espectros en FTIR para café tostado

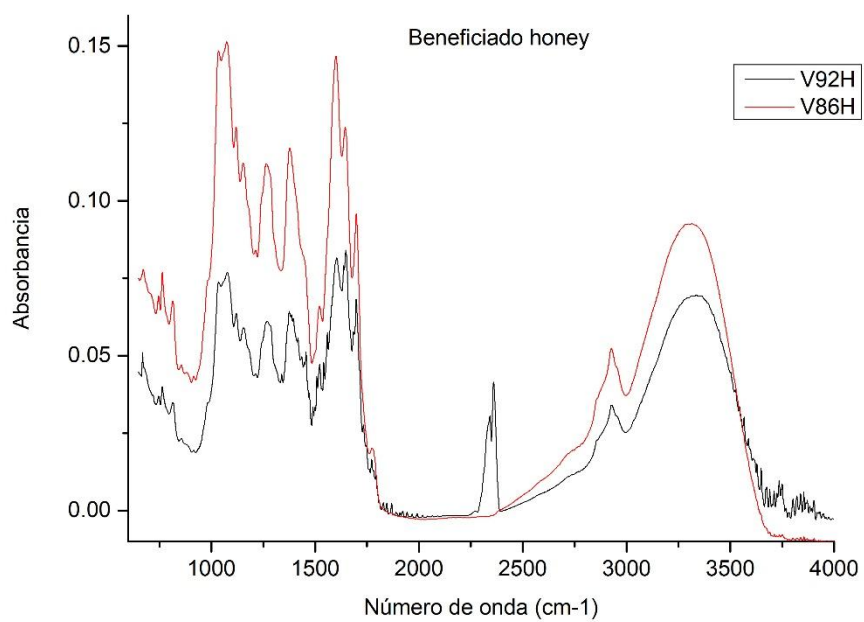
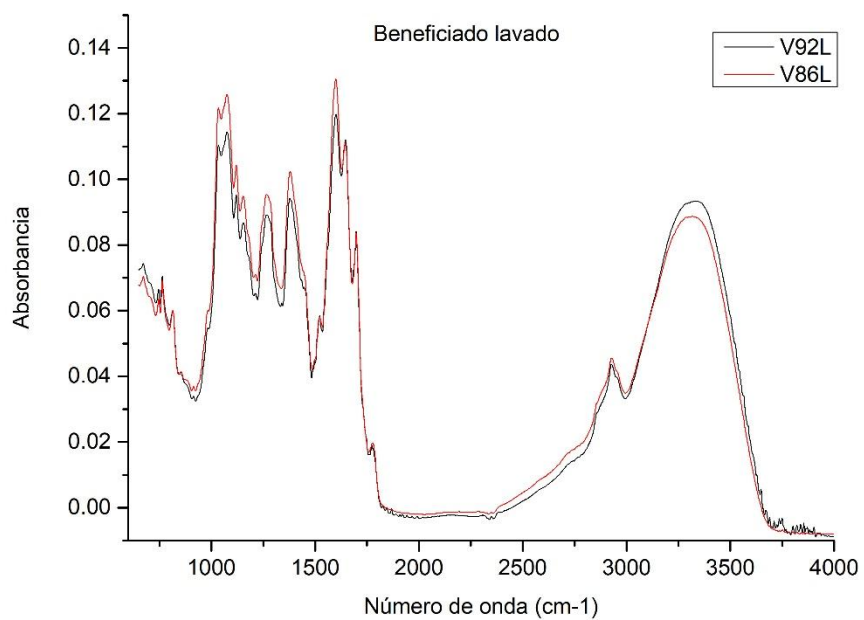
Espectros de Kalita





Espectros de V60



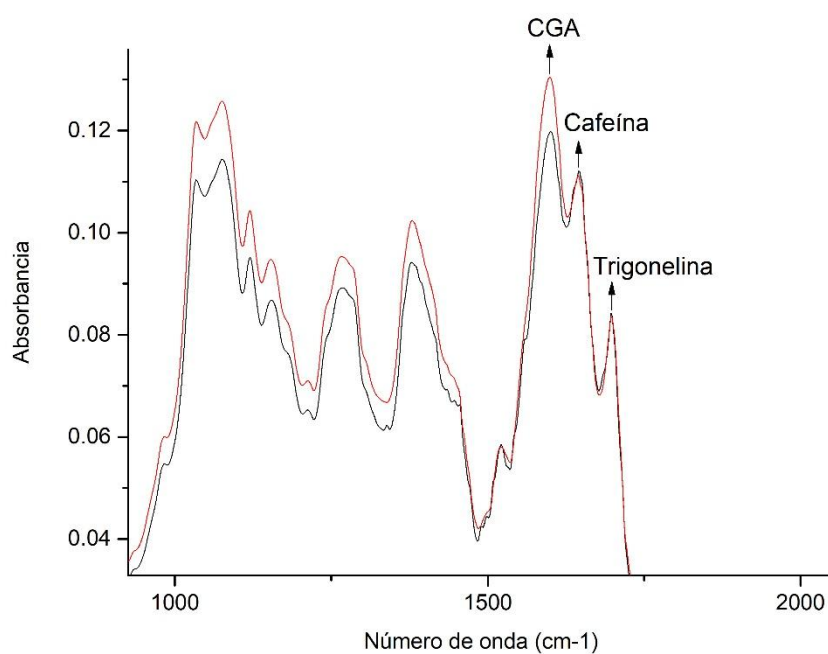


ANEXO XII Absorbancias y picos característicos en espectros de extractos de café tostado

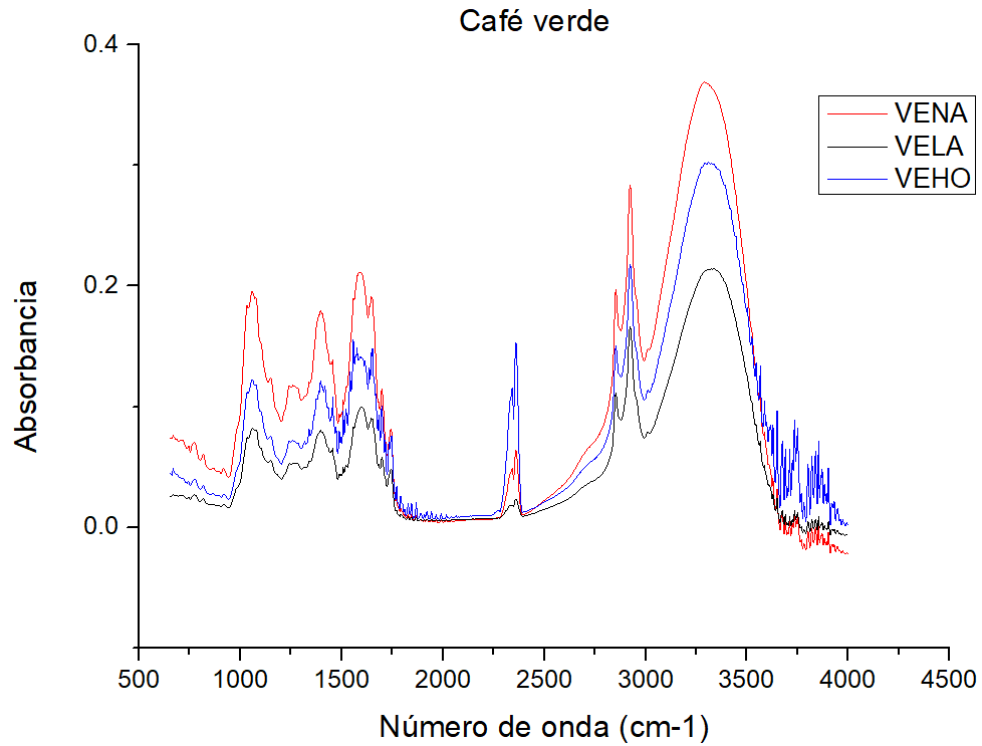
- Tabla de absorbancias leídas

Muestra	CGA	Cafeína	Trigonelina
K92N	0.12939	0.11173	0.08550
K86N	0.19815	0.16036	0.12166
K92L	0.12855	0.11660	0.08925
K86L	0.09814	0.10381	0.07904
K92H	0.17928	0.14871	0.11467
K86H	0.15267	0.14400	0.10767
V92N	0.12490	0.11950	0.09103
V86N	0.13340	0.11514	0.08963
V92L	0.11974	0.11203	0.08412
V86L	0.13042	0.11115	0.08355
V92H	0.08157	0.08410	0.06823
V86H	0.14659	0.12377	0.09569

- Picos característicos de cada compuesto en el espectro



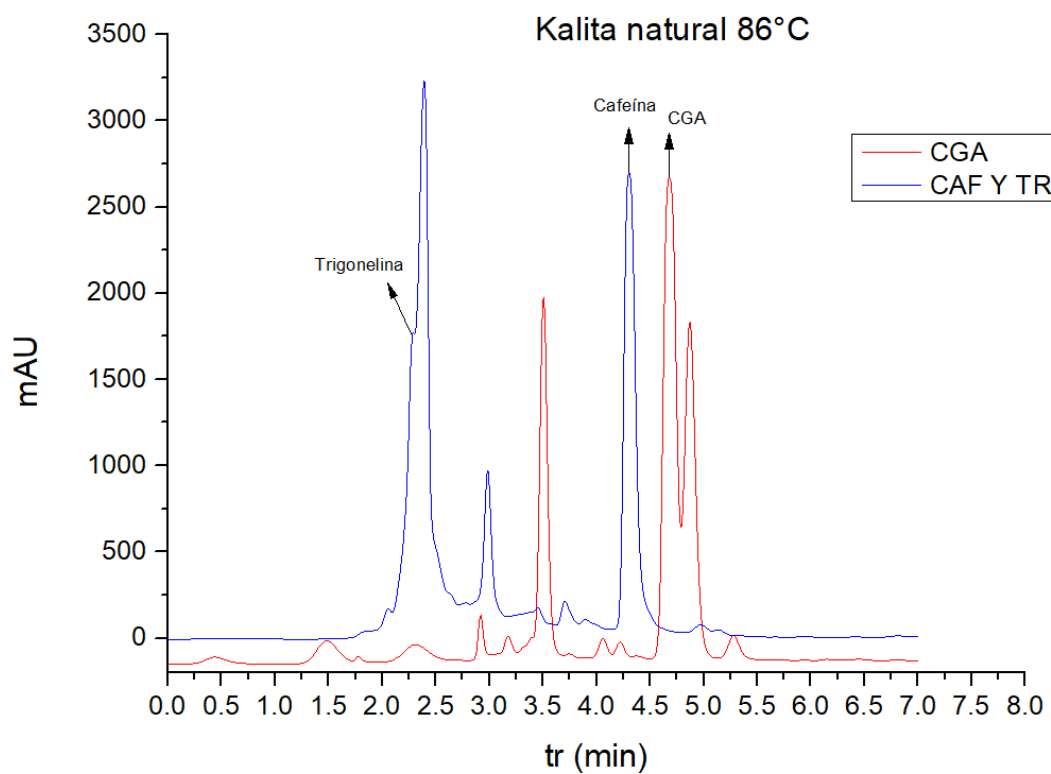
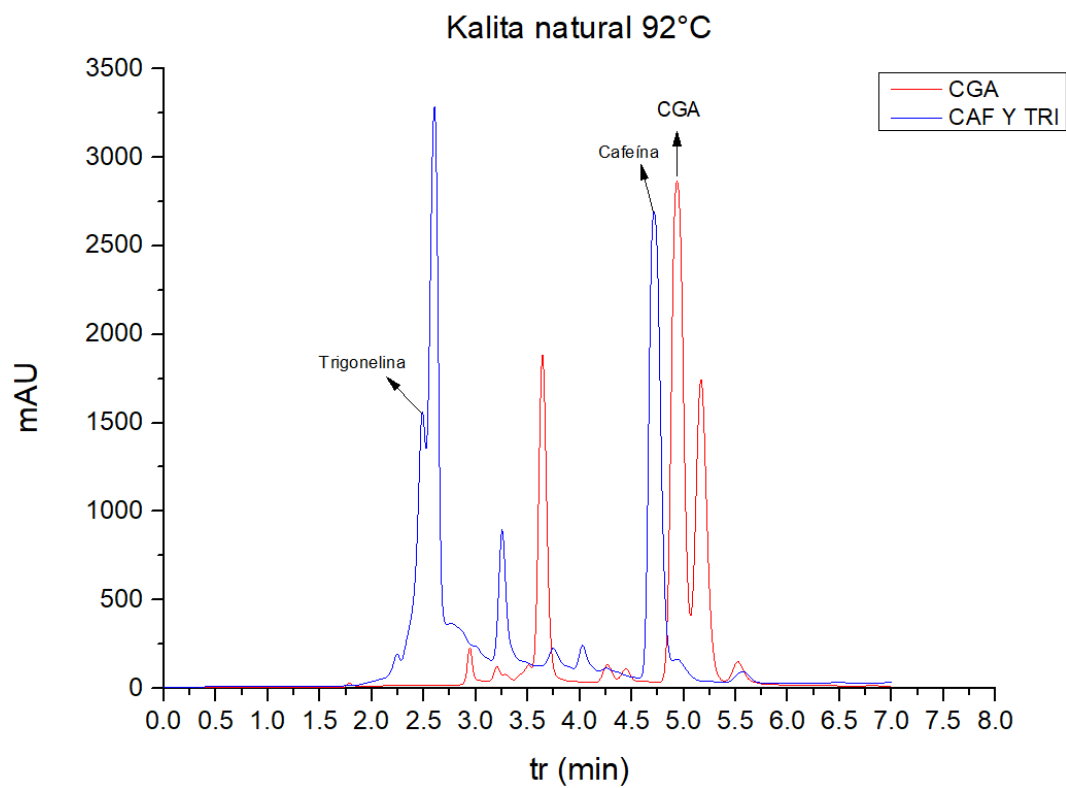
ANEXO XIII Espectros en FTIR para café verde y absorbancias leídas en café verde

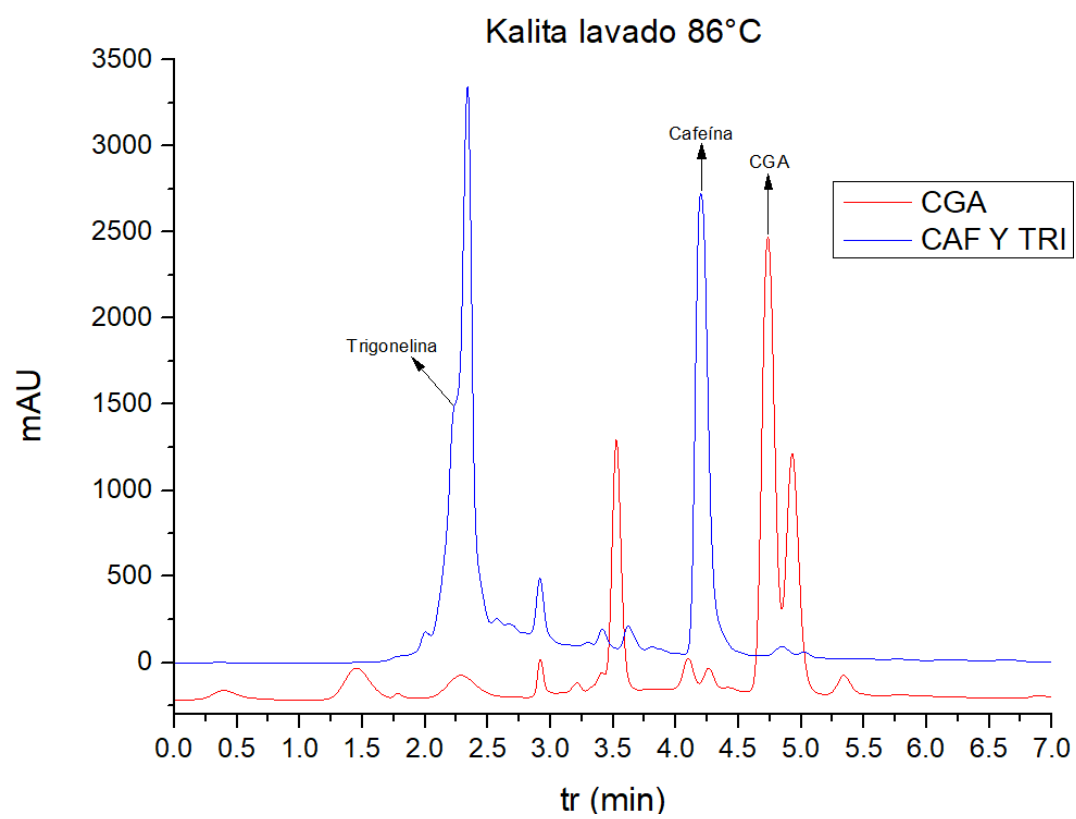
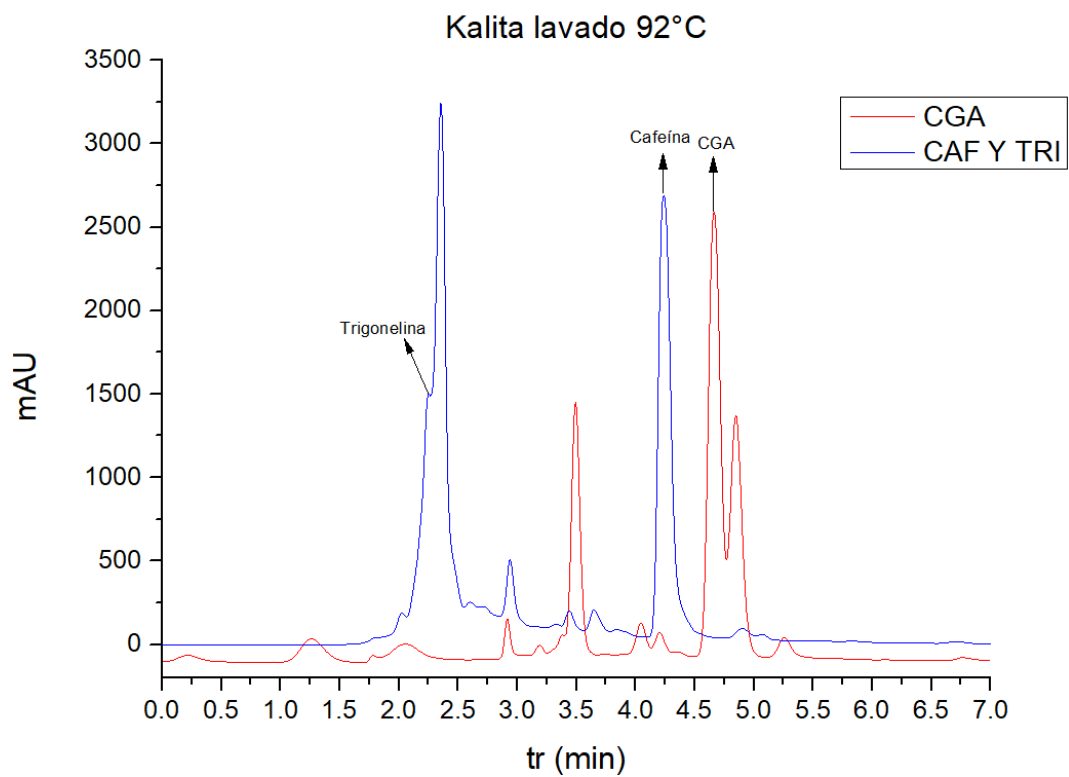


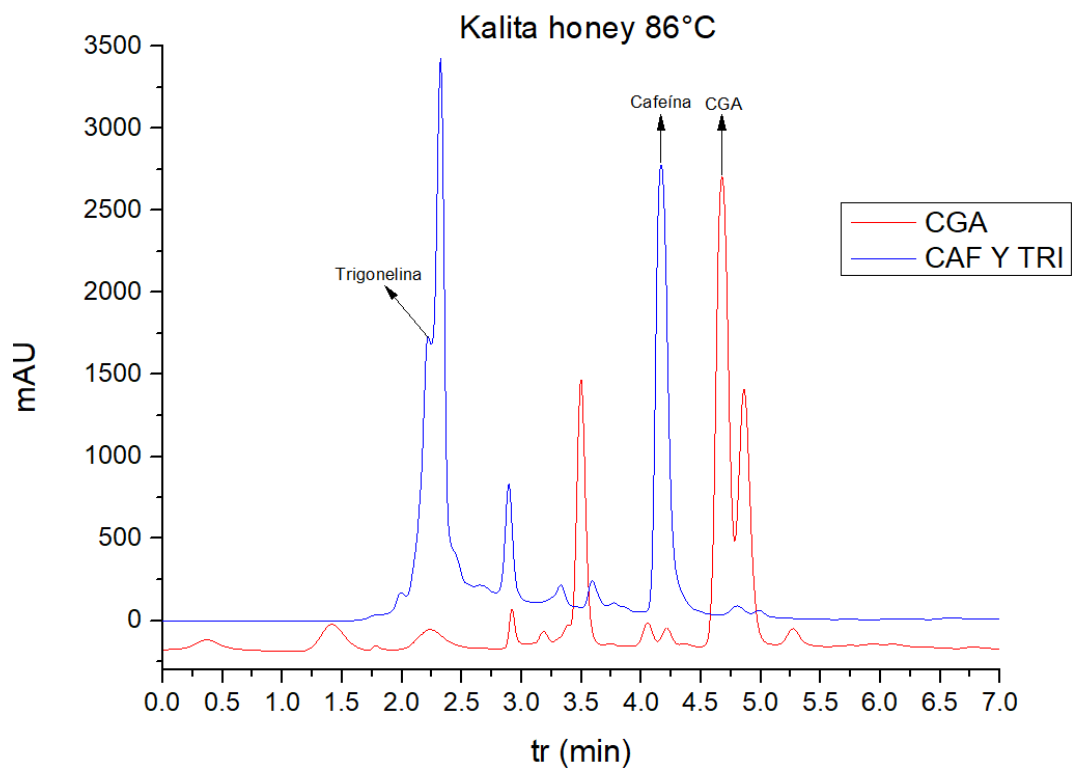
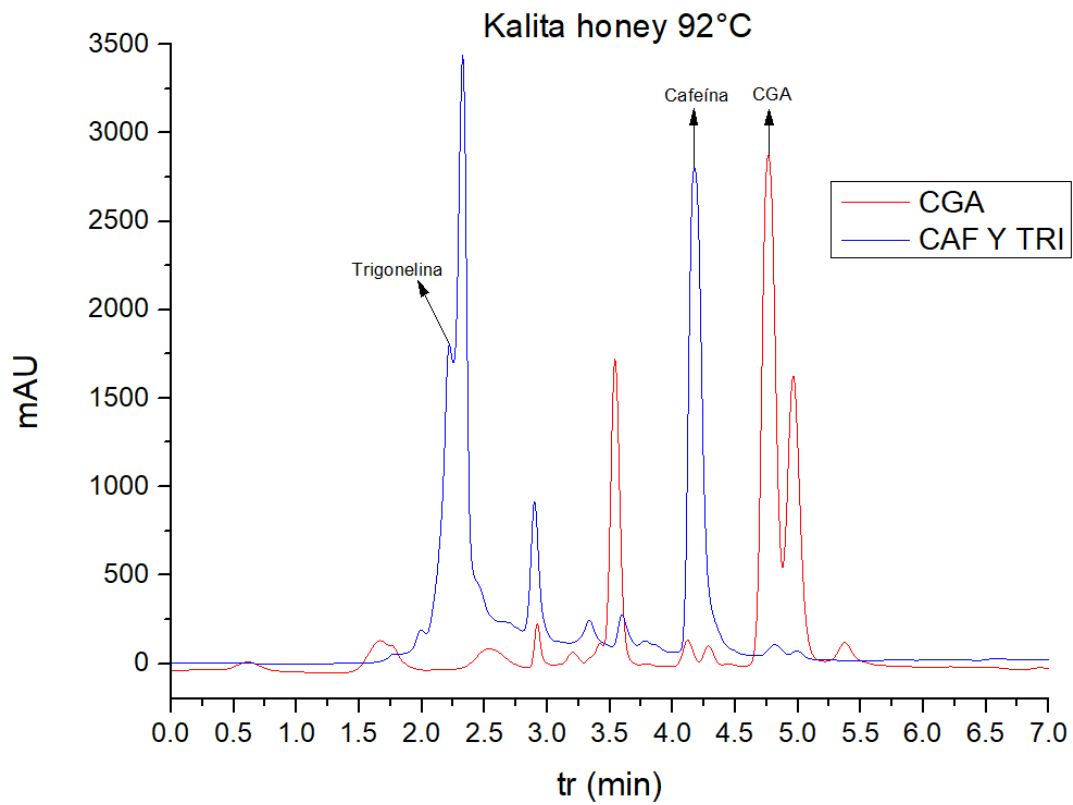
- Tabla de absorbancias leídas

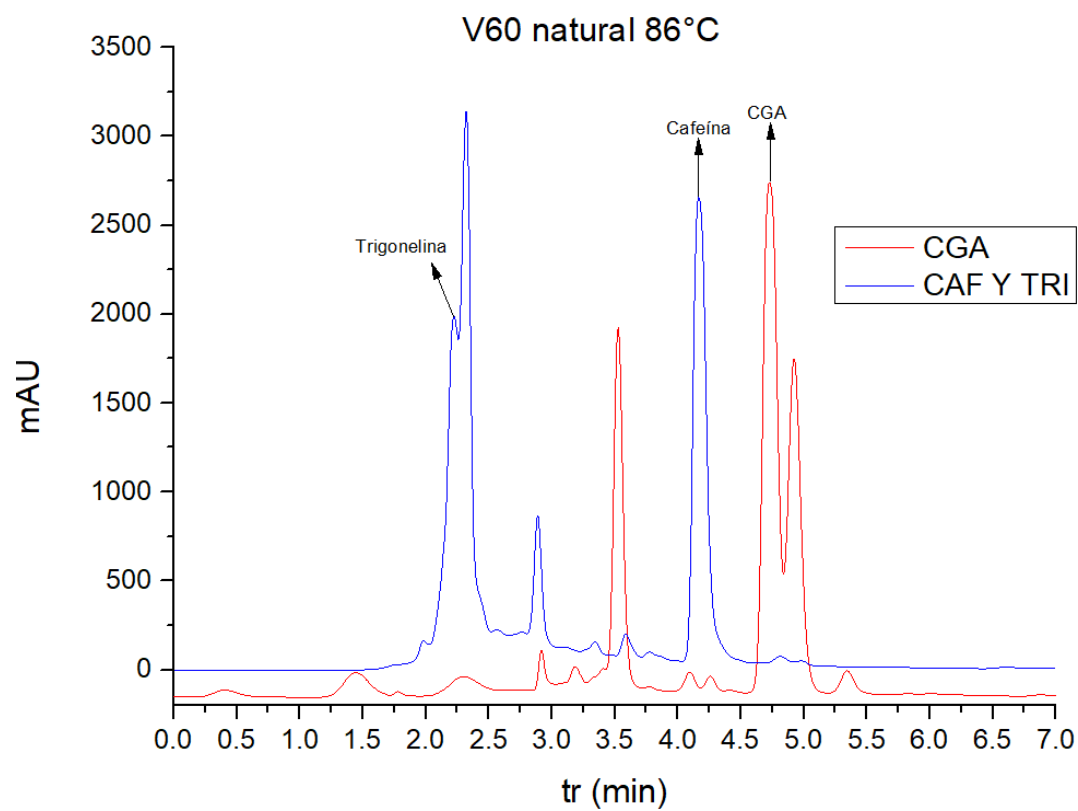
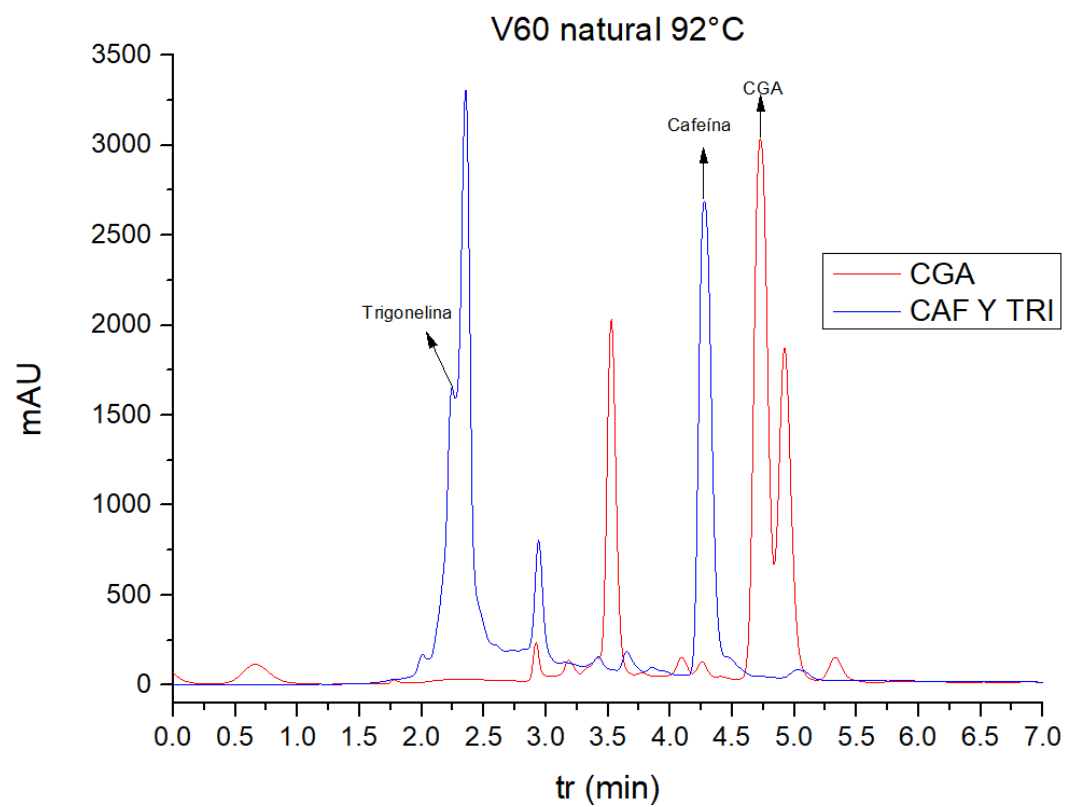
Muestra	CGA	Cafeína	Trigonelina
VENA	0.13996939	0.134253784	0.09897677
VELA	0.12928511	0.110920954	0.08494319
VEHO	0.14006943	0.135593761	0.0989783

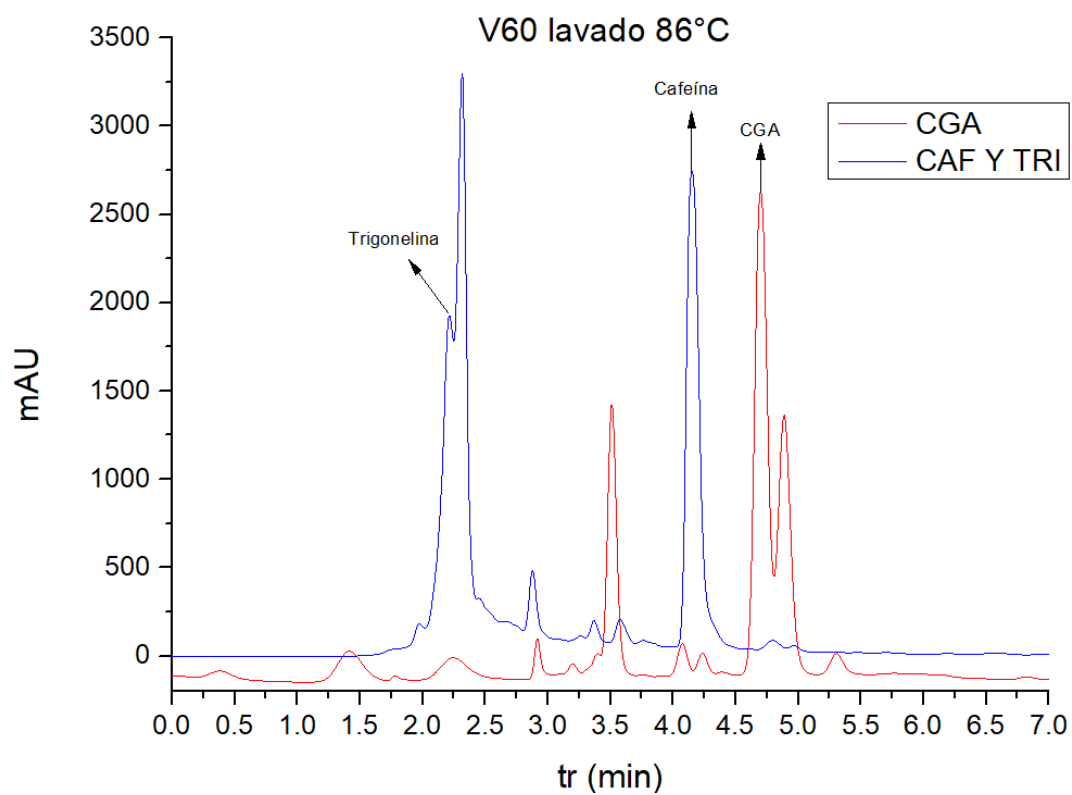
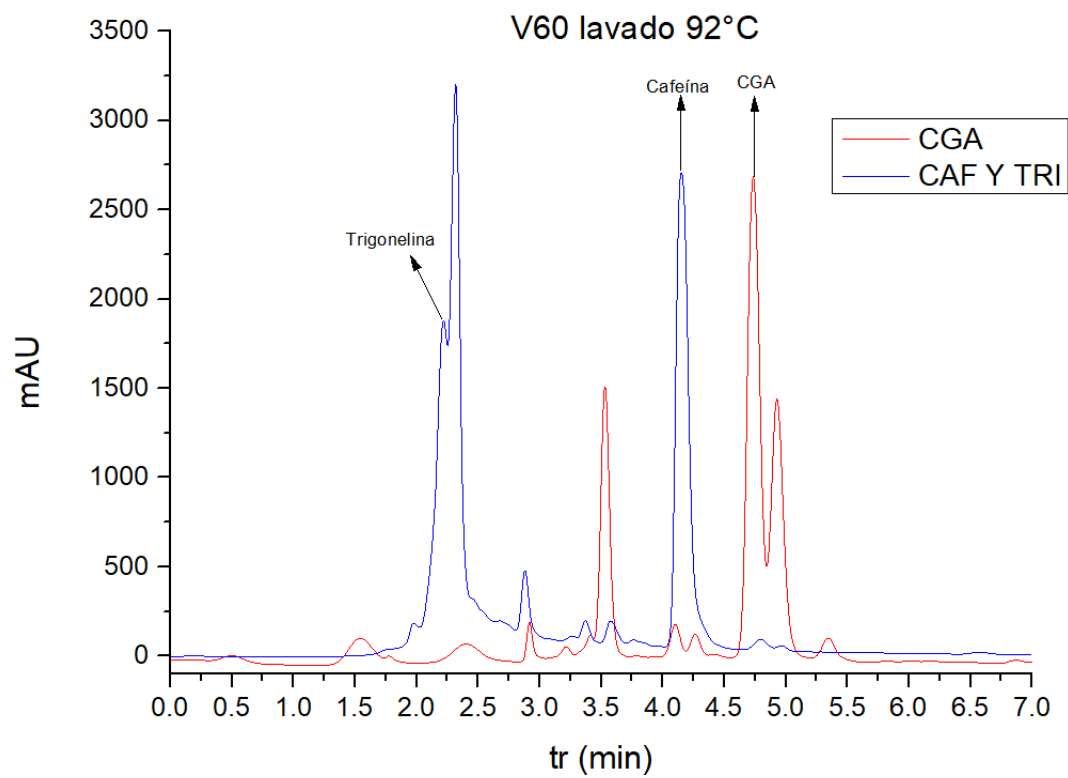
ANEXO XIV Cromatogramas obtenidos en HPLC de los extractos de café tostado

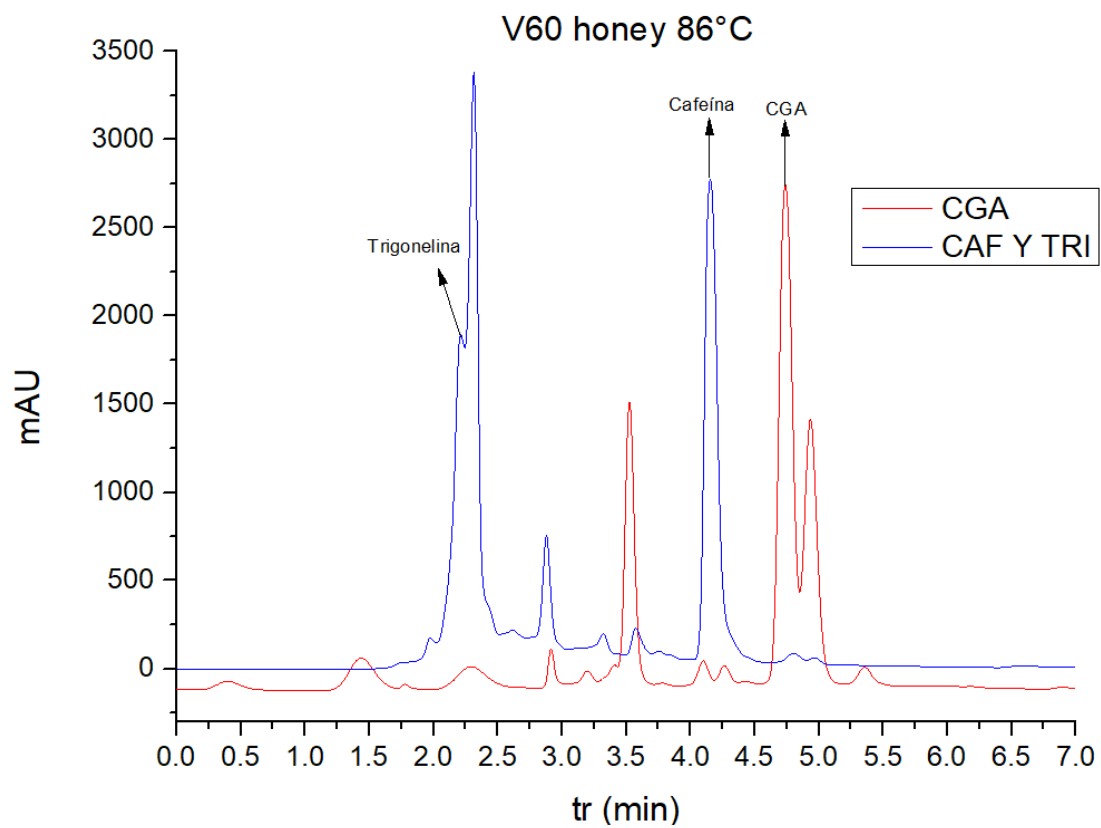
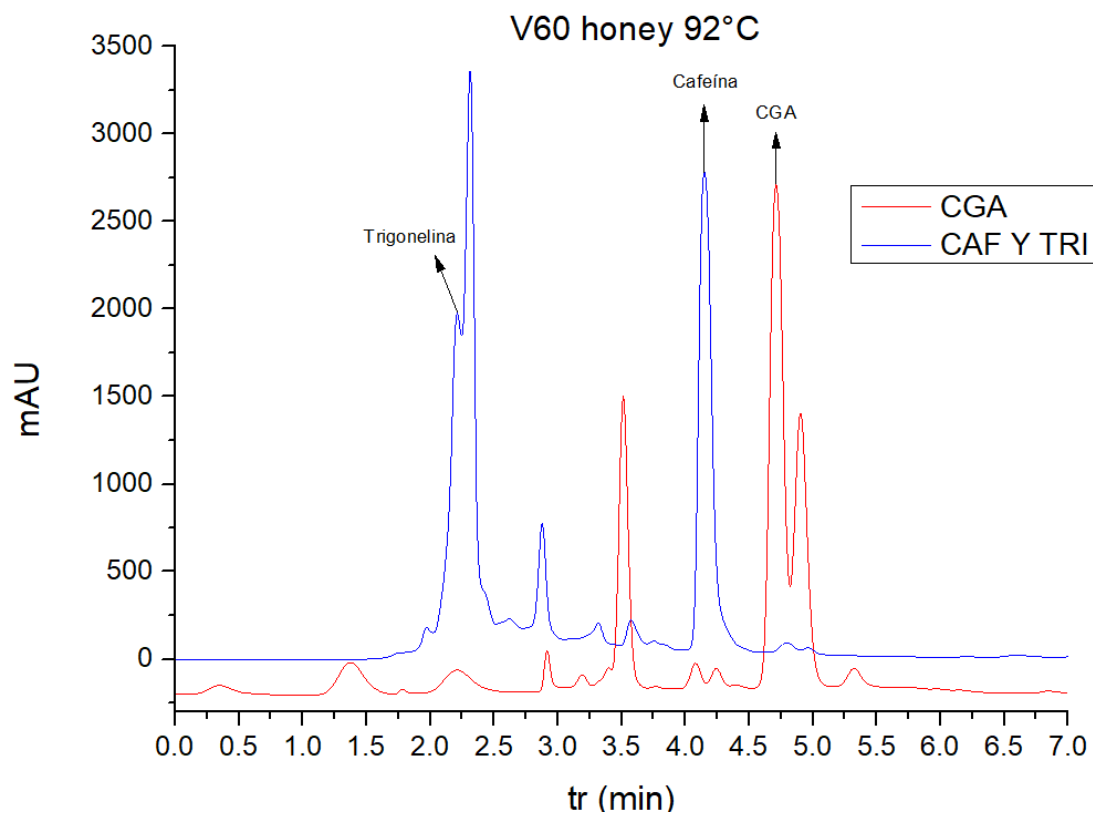












ANEXO XV Cromatogramas obtenidos en HPLC de los extractos de café verde

