EVALUACIÓN DEL SECADO ASISTIDO POR BOMBA DE CALOR PARA EL CAFÉ ORGÁNICO ARÁBICO

Autores:

Juan David Castrillón Martínez

Cód. 1922017

Gabriel Antonio Delgado Loaiza

Cód. 1924688

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Alimentos

Director:

Juan Carlos Gómez Daza

Codirector:

Francia Milena Mejía Lotero

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Alimentos

Programa de Ingeniería de Alimentos

Santiago de Cali - Colombia

2025

Tabla de contenido

Resumen 1
Abstract 1
1. Introducción 2
2. Planteamiento del problema 3
2.1. Justificación 5
2.2. Pregunta de investigación 7
3. Objetivos 7
3.1. Objetivo general 7
3.2. Objetivos específicos 7
4. Hipótesis 7
5. Antecedentes 8
5.1. Estudios previos sobre secado de café 8
6. Marco teórico 11
6.1. Café Arábica (*Coffea Arábica*) 11
6.1.1. Composición nutricional 12
6.2. Usos posteriores de los subproductos del café 13
6.3. Defectos en la producción del café 15
6.4. Comercialización del café 17
6.5. Café de especialidad 18
6.5.1. Clasificación de cafés especiales en Colombia 19
6.5.2. Specialty Coffee Association (SCA) 20
6.5.3. Diferencias entre café de especialidad y café comercial 21
6.6. Métodos de secado del café 22
6.6.1. Secado solar de café 22
6.6.2. Secado mecánico del café 22
6.6.3. Secado asistido por bomba de calor 24
6.7. Factores clave en el secado del café 28
6.7.1. Humedad relativa 28
6.7.2. Temperatura 29
6.7.3. Velocidad del aire 30
7. Materiales y métodos 30
7.1. Diseño de la investigación 31
7.2. Materia prima 31
7.3. Ubicación del experimento 32
7.4. Proceso experimental 32
7.4.1. Secado del café 32
7.4.2. Secador modificado asistido por bomba de calor: características y funcionamiento 33
7.4.3. Determinación de la cinética de secado 33
7.4.4. Medición y control de la humedad relativa, temperatura y humedad del aire en circulación durante el secado 33
7.4.5. Determinación del color 34

7.4.6. Evaluación de la calidad y categoría del café (propiedades organolépticas) 34
7.4.7. Diseño experimental y análisis de datos 34
8. Resultados y discusión 36
8.1. Cinética de secado 36
8.2. Temperatura y humedad relativa, y su efecto en el secado 40
8.3. Velocidad del aire 43
8.4. El secado y su influencia en el color y calidad 45
8.5. Implicaciones de los resultados en la industria 53
9. Conclusiones 54
10. Bibliografía 55

Lista de tablas

Tabla 1 Clasificación de bebidas de café mediante el método SCA (Specialty Coffee Association, 2024) 21
Tabla 2 Diseño experimental 35
Tabla 3 Datos utilizados para el análisis estadístico en el tiempo de secado 38
Tabla 4 ANOVA – Tiempo de secado 38
Tabla 5 Prueba de Tukey – Tiempo de secado 39
Tabla 6 Perfil sensorial de los diferentes métodos de secado. Fuente: elaboración propia 50
Tabla 7 Datos utilizados para el análisis estadístico en el análisis sensorial 51
Tabla 8 ANOVA - Puntaje SCA 51
Tabla 9 Prueba de Tukey - Puntaje SCA 51

Lista de figuras

Figura 1 Secado convencional asistido por bomba de calor *Basado en la información de "Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios", Por Gómez-Daza (2023), *Ing-Nova*, 2(2) 25
Figura 2 Secado modificado asistido por bomba de calor. *Basado en la información de "Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios", Por Gómez-Daza (2023), *Ing-Nova*, 2(2) 25
Figura 3 Distribución geográfica de las muestras de café en el Valle del Cauca 32
Figura 4 Humedad del grano en función del tiempo bajo diferentes humedades relativas 36
Figura 5 Temperatura del aire en función del tiempo bajo diferentes humedades relativas 40
Figura 6. Humedad relativa teórica de 20% y la humedad relativa real en función del tiempo para la bandeja superior (a) e inferior (b) 42
Figura 7 Humedad relativa teórica de 30% y la humedad relativa real en función del tiempo para la bandeja superior (a) e inferior (b) 43

Figura 8 Humedad relativa teórica de 40% y la humedad relativa real en función del tiempo para la bandeja superior e inferior 43
Figura 9. Humedad del aire circulante durante el ciclo refrigerante en función del tiempo en la condición de 20% HR 43
Figura 10. Humedad del aire circulante durante el ciclo refrigerante en función del tiempo en la condición de 30% HR 44
Figura 11. Humedad del aire circulante durante el ciclo refrigerante en función del tiempo en la condición de 40% HR 44
Figura 12 Distribución de L* en las muestras de café pergamino.....45
Figura 13 Distribución de a* en las muestras de café pergamino 46
Figura 14 Distribución de b* en las muestras de café pergamino 46
Figura 15 Puntaje final SCA para las muestras de café.....47
Figura 16 Distribución de fragancia para las muestras de café 48
Figura 17 Distribución de sabor para las muestras de café.....48
Figura 18 Distribución de acidez para las muestras de café.....49
Figura 19 Distribución de cuerpo para las muestras de café 49
Figura 20 Distribución de balance para las muestras de café.....50

Resumen

El trabajo de grado aborda la evaluación de un secador innovador asistido por bomba de calor para el proceso de secado del café, con énfasis al café de especialidad, específicamente controlando la humedad relativa en lugar de la temperatura, como en los métodos tradicionales. Este enfoque busca minimizar los daños térmicos al grano, preservando su calidad sensorial y física. Mediante un diseño experimental que incluyó variables cuantitativas (cinética de secado, color, y evaluaciones sensoriales por catadores SCA), se analizaron muestras secadas a diferentes niveles de humedad relativa (20%, 30% y 40%) y un método tradicional. Los resultados muestran que el control de la humedad relativa permite tiempos de secado más cortos, estabilidad en el proceso y color en café pergamino más uniforme con el secado al 40% HR, destacándose éste en la calidad de taza según las evaluaciones sensoriales.

Palabras clave: Secador asistido, bomba de calor, café lavado, cinética, café de especialidad, *Coffea arabica,* análisis organoléptico.

Abstract

This degree thesis focuses on the evaluation of an innovative heat pump-assisted dryer to optimize the drying process of specialty coffee by controlling relative humidity instead of temperature, as in traditional methods. This approach aims to minimize thermal damage to the coffee beans while preserving their sensory and physical quality. Through an experimental design that included quantitative variables (drying kinetics, color, and sensory evaluations by SCA-certified cuppers), coffee samples dried at different relative humidity levels (20%, 30% y 40%) and a traditional method were analyzed. The results show that controlling relative humidity allows for shorter drying times and greater process stability, with 40% RH drying standing out in cup quality according to sensory evaluations.

1. Introducción

El café, una planta perteneciente al género *Coffea*, consta de alrededor de 100 especies, de las cuales tres son cultivadas para uso comercial: *Coffea Arabica L.*, conocida como arábica; *Coffea Canephora Pierre exFroehner*, conocida como robusta; y *Coffea liberica Bull exHiern*. Entre éstas, las dos primeras son especialmente destacadas (Patiño-Velasco et al., 2016). La mayor cantidad de café producido en el mundo proviene de dos especies entre las más de 100 existentes con el gen Coffea. Estas dos especies son las mencionadas anteriormente: arabica y robusta, representando el 60 y 40 %, respectivamente de la producción mundial. Estos dos tipos de genes se diferencian por su forma, condiciones de crecimiento y desarrollo, composición química, gusto, sabor y aroma. El café arábigo es considerado un café suave, al tener menor contenido de cafeína y un mejor sabor. En cambio, el café robusta es más fuerte, con mayor contenido de cafeína y más amargo (Velásquez & Trávez, 2019).

El cafeto es indudablemente uno de los productos más importantes del comercio internacional global y en la actualidad se produce café en distintas regiones, de acuerdo con la Organización Internacional del Café (ICO) Colombia es uno de los países de mayor producción después de Brasil y Vietnam, en 2022, los 10 mayores países productores de café controlaron el 88% de la producción mundial e incluyeron: Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia, Etiopía, Uganda, Honduras, India, Guatemala y México. Se calcula que la producción total en el año cafetero fue de 168,2 millones de sacos de 60 kg en 2022 (ICO & UNIDO, 2024).

El secado es una operación unitaria que consiste en eliminar la humedad en el grano, la cual puede variar inicialmente de un 48 a 56% contenido de humedad en base húmeda (CHbh) y se busca reducirla a un rango de 10 a 12% CHbh. El producto obtenido del proceso de secado se denomina café pergamino. El secado permite conservar la calidad fisicoquímica y organoléptica del grano al reducir la actividad de agua, evitando su deterioro e impidiendo la proliferación de microorganismos y la actividad enzimática que pueden deteriorar la calidad del grano durante su almacenamiento (Largo, 2020). La cantidad de carbohidratos, proteínas y aminoácidos puede variar significativamente si se realiza un inadecuado proceso de secado, donde alcanzar temperaturas superiores a 50°C en el grano genera disminución en la cantidad de estos compuestos (Shibamoto, 2015). Además, en los granos de café secos, la presencia de compuestos orgánicos como los ácidos clorogénicos permite que se formen muchos compuestos aromáticos en el proceso de tostión (Largo, 2020).

Para asegurar la calidad del café es importante controlar adecuadamente cada una de las etapas de su producción o proceso de beneficio, ya que los frutos frescos del café son altamente susceptibles a la acción de patógenos y a procesos de deterioro, tales como el oscurecimiento, la pérdida de textura y la degeneración debido a enzimas naturales presentes en ellos. Si el procesamiento no se realiza de manera oportuna, estos factores tienen un efecto grave en la composición de los granos de café, lo que a su vez reduce su valor comercial. El proceso de secado ha surgido como una solución eficaz frente a esta situación, y ha impulsado el crecimiento de una industria cafetera altamente productiva y eficiente (Dong et al., 2019a).

El secado del café desempeña un papel crucial en el proceso de beneficio, ya que cumple diversos objetivos esenciales. Entre ellos se encuentran prevenir la germinación de las semillas, reducir la humedad, controlar el crecimiento de hongos, preservar la integridad física y composición química de los granos, y lograr un producto final estable que conserve su calidad durante períodos prolongados (Henao, 2016). Existen principalmente dos métodos de secado en Colombia, el natural al sol, y el mecánico (Moreno & Rodríguez, 2022). El secado en forma natural es el proceso tradicional, ya que le atribuye al café cualidades importantes, sobre todo de sabor; a pesar de ser un método económico y sencillo, el proceso de secado presenta diversas desventajas notables. Entre ellas, cabe destacar la necesidad de condiciones atmosféricas específicas, como altas temperaturas y baja humedad, así como la laboriosa tarea de proteger los granos durante episodios de lluvia o durante la noche. Además, este método expone los granos a posibles contaminantes y a los efectos negativos de la precipitación pluvial. El secado del café mediante métodos artificiales o mecánicos implica el uso de corrientes de aire generadas mediante ventilación forzada. En algunos casos, el aire puede ser calentado para acelerar el proceso de secado (Besora, 2017).Sin embargo, es importante que en secadores mecánicos (sean horizontales, verticales o mixtos) no se excedan temperaturas de 40-45°C para evitar daños térmicos en la estructura del grano (Casé, 2022).

Para superar estas limitaciones influenciadas por el proceso de secado solar que generan reacciones degenerativas que afectan el valor nutricional, la textura, color, olor y sabor, es preciso estudiar un sistema de secado eficiente (Moreno & Rodríguez, 2022). Los sistemas de secado asistido por bomba de calor son dispositivos energéticamente eficientes debido a su capacidad para generar más cantidad de energía térmica que el trabajo que requiere, y también son tecnologías respetuosas con el medio ambiente (Mohanraj et al., 2018). La principal ventaja del secador asistido por bomba de calor aplicado al proceso de secado radica en la posibilidad de regular de manera independiente la humedad relativa del aire (Gómez-Daza, 2023). Esto lo hace particularmente adecuado para el secado de productos sensibles a variaciones térmicas y de humedad, promoviendo el desarrollo de procesos más sostenibles y garantizando la obtención de productos de alta calidad (Espinosa-Sandoval et al., 2016). Por tanto, este estudio tiene como finalidad evaluar el impacto de la humedad relativa en el proceso de un secado asistido por bomba de calor modificado, con el fin de identificar las condiciones que favorecen la cinética de secado y preservan las propiedades organolépticas del café orgánico arábico.

2. Planteamiento del problema

El secado del café es una etapa crítica en la cadena de producción, ya que influye directamente en su calidad física, química y sensorial. Tradicionalmente, los caficultores colombianos utilizan el secado solar; sin embargo, este método presenta múltiples limitaciones. Al depender de las condiciones climáticas, la temperatura y la humedad no se mantienen constantes, lo que prolonga el proceso y aumenta la susceptibilidad a la contaminación. Además, factores como la radiación solar y la exposición al ambiente pueden alterar la composición química del grano (Largo, 2020).

Estudios previos han demostrado que el secado mecánico ofrece mayor uniformidad en la humedad y una mejor conservación de los granos en comparación con el secado solar (Guevara-Sánchez et al., 2019). Sin embargo, en muchas regiones de Colombia, los altos costos del secado mecánico, la falta de infraestructura y la necesidad de liquidez inmediata llevan a los productores a realizar ventas de café húmedo a las cooperativas. Estas prácticas pueden comprometer la calidad del grano, como lo evidencia un estudio en Caldas, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca, donde el 32,4% de las muestras analizadas obtuvieron menos de 60 puntos en la escala SCAA, indicando baja calidad. Además, el 35,1% presentó defectos en taza, siendo el defecto terroso el más frecuente (46,2%), seguido por defectos de inmadurez y fermentación (23,1%) (Oliveros et al., 2016).

El contenido de humedad es un factor determinante en la calidad del café almacenado. En regiones tropicales con alta humedad y precipitaciones frecuentes, se ha reportado un deterioro de hasta el 50% del grano durante la cosecha, lo que reduce su valor comercial y genera pérdidas económicas para los caficultores (Guevara-Sánchez et al., 2019). Por ello, el proceso de secado requiere un control riguroso para minimizar la degradación del grano.

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) y la Norma Técnica Colombiana (NTC) establecen lineamientos para la clasificación del café según parámetros físicos y sensoriales, desde excelso (tipo exportación) hasta consumo (mercado interno) y pasilla (menor calidad). La presencia de defectos, incluso en pequeñas proporciones, afecta su categoría, impactando su precio en el mercado y limitando el acceso a nichos de alto valor agregado, como el de cafés de especialidad (Comité Nacional de Cafeteros, 2016). Según la Norma Técnica Colombiana NTC 5938:2024 los defectos en el café verde se clasifican en mayores, menores, de impacto medio y otros, afectando directamente la calidad del grano.

- Defectos mayores: Incluyen granos cardenillo, vinagre parcial o total, y negro parcial o total.
- Defectos menores: Comprenden granos cristalizados, veteados, sobresecados, ámbar, mantequillo, decolorados, reposados, aplastados, malformados, flojos, entre otros.
- Defectos de impacto medio: Involucran granos astillados, averanados, inmaduros, flotadores, y otros con daños mayores al 50%.
- Otros: Incluyen materia extraña, impurezas y grano guayaba.

Un secado inadecuado es responsable de 8 de los 14 defectos que pueden presentarse en el café pergamino, afectando principalmente los defectos mayores y algunos menores como cristalizado, decolorado, veteado, sobresecado y aplastado (Comité Nacional de Cafeteros, 2019) Esto provoca que el café baje de categoría, pasando de excelso a consumo o incluso a pasilla, lo que impacta negativamente la rentabilidad de los productores.

Dado el impacto del secado en la calidad final del café, es necesario evaluar métodos alternativos que garanticen una mayor estabilidad en las condiciones de secado y reduzcan la aparición de defectos, permitiendo así mejorar la competitividad del café colombiano en mercados de alto valor.

2.1. Justificación

La agricultura es el sector económico de mayor dinámica en Colombia, según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2024) aporta el 9% al PIB del país y específicamente el Café aporta el 25,8% del valor agregado, éste es el producto más exportado con 553 millones de dólares y es cultivado en el 40% de la tierra agrícola total del país. Los beneficios que otorga el café provienen del proceso de secado (Manrique et al., 2020) Para la conservación de un alimento debemos prolongar su vida al retardar la tasa de deterioro, lo que se puede lograr mediante diversas técnicas como el secado, el enfriamiento, el almacenamiento a temperatura constante, etc. La selección del proceso para un alimento en particular depende de su contenido de humedad y el uso de éste (Kumar et al., 2020).

El secado permite conservar la calidad fisicoquímica y organoléptica del grano al reducir la actividad de agua, evitando su deterioro e impidiendo la proliferación de microorganismos y la actividad enzimática que pueden deteriorar la calidad del grano durante su almacenamiento. Para Colombia el proceso de secado solar puede llegar a superar los 10 días, esto depende de las condiciones climáticas de cada región cafetera. El tiempo de secado solar es determinado por la cantidad de radiación solar disponible en el día y las condiciones climáticas de la noche. Todo esto genera que la pérdida de humedad en el grano no sea continua en el proceso de secado, lo que puede facilitar que al exterior e interior del grano de café se generen reacciones bioquímicas y fisiológicas que pueden alterar la calidad física y química del café (Largo, 2020). La cantidad de carbohidratos, proteínas y aminoácidos puede verse afectada significativamente por un proceso de secado inadecuado. La composición y concentración de los compuestos químicos presentes en los granos de café desempeñan un papel crucial en la generación de compuestos volátiles durante la tostión, los cuales influyen directamente en la calidad sensorial de la bebida. En particular, cuando el grano es sometido a temperaturas superiores a 50°C, se produce una reducción en la concentración de estos compuestos esenciales (Shibamoto, 2015) Se utilizan diferentes métodos para el secado, tales como secado solar, aire caliente convectivo, secado en horno, deshidratador y el secado asistido por bomba de calor (Goh et al., 2011)

El secado es el método más antiguo y económico para conservar frutas, verduras, especias y productos biológicos (Singh et al., 2020a). Algunos países en desarrollo y tropicales tienen dos métodos de secado populares para secar productos agrícolas: el sol abierto y los métodos de secado artificial (secador eléctrico o a combustible). El primero es simple y de bajo costo, pero requiere mucho tiempo y resulta en una baja calidad del producto, mientras que el segundo requiere menos tiempo, pero consume mucha energía y causa contaminación(Yahya et al., 2016).

Además de esto la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) establece requisitos rigurosos para la exportación de café pergamino seco, asegurando la calidad y competitividad del producto en mercados internacionales. Entre los aspectos clave, se exige que el café tenga una humedad entre el 10 al 12% para garantizar su adecuada conservación durante el transporte y almacenamiento. Además, el grano debe estar libre de impurezas, presentar uniformidad en su

tamaño y color. Estas especificaciones son fundamentales para mantener la reputación del café colombiano como uno de los mejores del mundo (Cenicafé, 2004)

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes tecnologías para el secado del café buscando mantener un equilibrio entre eficiencia y economía. Los procesos más económicos se basan en la utilización de energía solar y movimiento de aire por diferencia de densidad, sin embargo, estos métodos están sujetos a las condiciones climáticas de cada región, requieren de grandes áreas para el secado y mayor mano de obra empleada. Para dar solución a este problema se han desarrollado secadores mecánicos con los cuales se logra un mayor control en las condiciones de secado (Henao, 2016)

En Colombia el secado se realiza por medios naturales utilizando la energía solar y el aire, y por medios mecánicos con aireación forzada, para alcanzar una humedad en un rango de 10% al 12% en base húmeda. El secado mecánico del café se realiza en sistemas constituidos por una fuente de calor que en algunos casos cuentan con un intercambiador de calor, un ventilador y un espacio o *plenum* donde se deposita la masa de granos de café para el secado. El principal mecanismo utilizado en Colombia para realizar secado mecánico son los silos de capa estática, los cuales constan de un secador con uno o más compartimientos con piso de malla sobre el cual es depositado el grano; para el calentamiento del aire se han diseñado equipos que emplean principalmente: electricidad, gas propano y cisco de café (Parra Coronado et al., 2017). Además, el tiempo de exposición, la temperatura y el caudal del aire de secado, el contenido de humedad inicial y final del producto, así como la temperatura del aire ambiente, son factores que afectan a la dinámica de secado y tienen un efecto significativo en la calidad del café (Pabón & Osorio, 2022)

En respuesta a las restricciones derivadas del proceso de secado solar que pueden provocar reacciones degenerativas perjudiciales para el valor nutricional, la textura, el color, el aroma y el sabor del producto final, es fundamental realizar una investigación en busca de un sistema de secado altamente eficaz (Moreno & Rodríguez, 2022). El secado es una de las operaciones industriales más intensivas en consumo energético, representando hasta un 15% del uso total de energía en la industria. Los secadores convencionales tienen una eficiencia energética baja, con un rendimiento máximo de aproximadamente 35%, lo que implica un alto desperdicio de energía (Colak & Hepbasli, 2009).

En este contexto, los sistemas de secado asistido por bomba de calor (SBC) destacan por su eficiencia energética al ser capaces de producir una cantidad mayor de energía térmica de la que requieren para su operación. Además, se elogia su enfoque amigable con el entorno (Mohanraj et al., 2018). Estos SBC han surgido como una alternativa eficiente, consumiendo entre un 60% y un 80% menos de energía en comparación con los secadores tradicionales. Además de su eficiencia energética los SBC permiten el control preciso de la temperatura y la humedad, y su capacidad de operar independientemente de las condiciones climáticas. Además, a diferencia de otros métodos como el secado con aire caliente, al vacío o la liofilización, que son altamente demandantes en energía, los SBC ofrecen una opción más económica y ecológica. También mejoran la calidad del producto final, preservando mejor el color y el

aroma de los productos agrícolas secos. Finalmente, esta tecnología no emite gases ni contaminantes a la atmósfera, consolidándose como una opción ambientalmente responsable (Colak & Hepbasli, 2009). Es por esto, por lo que, a través de esta investigación, se busca contribuir a prácticas sostenibles y lograr productos de excelencia en el contexto del secado del café orgánico arábico, evaluando el impacto de la humedad relativa en la cinética de secado y las propiedades organolépticas del producto final

De manera complementaria, la entrada en vigor del Pacto Verde Europeo en octubre de 2024 representa un desafío y una gran oportunidad para el café orgánico colombiano en el mercado global. Esta normativa, que prioriza productos libres de deforestación y con trazabilidad verificable, abre un nicho estratégico para el café producido de forma sostenible y orgánica. Aunque cumplir con requisitos como la declaración de debida diligencia, los derechos laborales y la protección ambiental implica altos costos y esfuerzos de certificación, el café orgánico tiene una ventaja competitiva inherente, alineándose con las demandas de los consumidores europeos que valoran la sostenibilidad y la ética en la producción. Esto posiciona al café orgánico como una alternativa clave para capturar mercados premium y consolidar a Colombia como líder en prácticas sustentables en la industria cafetera (Arce, 2024)

2.2. Pregunta de investigación

¿Cuáles son las condiciones que favorecen el secado de café orgánico arábico en un secador asistido por bomba de calor modificado?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Evaluar el impacto de la humedad relativa en el proceso de secado asistido por bomba de calor modificado en la cinética de secado y las propiedades organolépticas del café orgánico arábico.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer la cinética de secado de los granos de café en un secador asistido por bomba de calor modificado.
- Determinar las condiciones de humedad relativa (20, 30 y 40%) que favorecen las propiedades organolépticas en los granos de café en un secador asistido por bomba de calor modificado.

4. Hipótesis

El secado de granos de café de categoría orgánica en un secador asistido por bomba de calor presenta mejores características de cinética de secado y propiedades organolépticas en comparación con el método de secado solar tradicional.

5. Antecedentes

5.1. Estudios previos sobre secado de café

Diversos estudios han investigado métodos de secado del café, examinando tanto la eficiencia en la reducción del contenido de humedad como el impacto en las propiedades físicas y químicas del grano. A continuación, se detallan los antecedentes relevantes en el contexto de la presente investigación.

Uno de los métodos estudiados ha sido el uso de secadores solares implementados con un sistema de flujo de aire continúo impulsado por energía fotovoltaica. Este estudio, realizado en la provincia de La Rioja, en la región San Martín, Perú, tuvo como objetivo reducir el tiempo de secado del café para alcanzar una humedad promedio del 12%. Utilizando un diseño experimental completamente al azar con un esquema factorial que incluyó dos factores (prototipos y tiempo de secado) y siete repeticiones, se logró reducir la humedad del grano a un promedio de 12,3% en un período de cinco días, utilizando un secador solar de 4 x 8 metros. Los resultados recomendaron el uso de este prototipo de secador solar para mejorar el proceso de secado del grano de café (Prada et al., 2019)

Dong et al. (2019) analizaron los perfiles volátiles y sensoriales de granos de café tostado de la variedad robusta, empleando nariz electrónica, lengua electrónica y espectrometría de masas acoplada a cromatografía de gases con microextracción en fase sólida de espacio de cabeza (HS-SPME-GC-MS). Los granos evaluados habían sido sometidos a distintos métodos de secado, incluyendo exposición directa al sol, secado solar, secado con bomba de calor, secado con aire caliente y liofilización. Los resultados evidenciaron que el método de secado tuvo un impacto significativo en el pH, la acidez titulable total, los sólidos totales y los sólidos solubles totales. Asimismo, la integración de los datos obtenidos a partir de la composición química, mediante las técnicas utilizadas, permitió diferenciar de manera efectiva las muestras de café tostado según el proceso de secado aplicado. En particular, el secado con bomba de calor destacó por su capacidad para preservar compuestos como cetonas, fenoles y ésteres.

Kulapichitr et al. (2019) estudiaron cómo diferentes métodos de secado afectan la calidad del café Arábica. Compararon el secado con bomba de calor a 40, 45 y 50 °C, el secado en bandeja con aire caliente y el secado al sol. Los resultados indicaron que el contenido de cafeína no se vio alterado por el proceso de secado, pero sí hubo variaciones en los niveles de ciertos aminoácidos. Además, los métodos de secado con bomba de calor y aire caliente permitieron obtener una mayor concentración de sacarosa en comparación con el secado solar. En cuanto al aroma de la bebida, este fue similar entre los cafés secados al sol y con bomba de calor, pero mostró diferencias respecto al secado con aire caliente. El análisis estadístico de correlaciones evidenció una clara separación entre el secado solar y los métodos de secado con bomba de calor y aire caliente.

Este estudio comparó el secado convectivo (SC) y el secado con bomba de calor (SBC) en rodajas de melón (Cucumis melo L.), evaluando su efecto en las cinéticas de secado, el coeficiente de difusión efectiva (De) y la actividad de agua (aw). Se emplearon temperaturas de 50°C con velocidades de aire de 0,5 y 1 m/s. Los resultados mostraron que el SBC, especialmente a 1 m/s, redujo significativamente el tiempo de secado (3,6 h frente a 6,5 h en SC), aumentó la difusión del agua y alcanzó menores valores de aw, lo que mejora la estabilidad microbiológica del producto. El modelo de Midilli presentó el mejor ajuste para describir las cinéticas de secado. Se concluye que el SBC con alta velocidad de aire es más eficiente en términos de calidad y tiempo de secado en comparación con el SC (Espinosa-Sandoval et al., 2016).

Dong et al. (2017) estudiaron el impacto de distintas técnicas de secado en los componentes bioactivos, la composición de ácidos grasos y el perfil de compuestos volátiles de los granos de café robusta. Evaluaron los métodos de exposición directa al sol, secado solar en gabinete, secado con bomba de calor, secado con aire caliente y liofilización. Los resultados indicaron que la liofilización es un método eficiente para preservar los ácidos grasos saturados e insaturados, así como los ácidos orgánicos. Por otro lado, el secado con aire caliente resultó ser el más adecuado para conservar ácidos grasos poliinsaturados y aminoácidos. En total, identificaron 62 compuestos volátiles en los granos sometidos a diferentes procesos de secado. El secado con bomba de calor generó la mayor cantidad de compuestos volátiles, mientras que la liofilización permitió obtener la mayor concentración de estos. Además, se observó una estrecha relación entre los métodos de exposición directa al sol, secado solar en gabinete y secado con bomba de calor, mientras que la liofilización y el secado con aire caliente mostraron diferencias significativas tanto entre sí como con los demás métodos de secado.

Otro estudio clave exploró el secador con bomba de calor (HP) en comparación con otros métodos, como el secado en bandeja (TD) y el secado al sol (SD). Este estudio se enfocó en los cafés verdes arábigos tailandeses y evaluó indicadores cualitativos específicos, como el contenido de ácido clorogénico (CGA), el contenido fenólico total (TPC), el potencial antioxidante reductor férrico (FRAP) y los parámetros de color. Los resultados mostraron que, entre los tratamientos de secado evaluados, HP (50 C) produjo cafés verdes con niveles comparables de CGA (4016,0) a los de los cafés verdes SD (4453,5). Los cafés verdes HP (50 C) tuvieron mayores actividades antioxidantes y TPC (65,4 y 53,1 respectivamente) que los cafés SD (56,2 y 48,8) y TD (56,3 y 41,2). Los cafés HP (50 C) tuvieron un valor de brillo (L*) más alto (60,8) y un tono más verdoso según el análisis de color CIE-LAB, sugiriendo que este método podría ser una alternativa viable al secado convencional (Kulapichitr et al., 2022).

En un estudio sobre el efecto de la altitud en la calidad del café (*Coffea arabica L.*), se compararon los métodos de secado mecánico y tradicional en distintas altitudes dentro del valle de Alto Mayo, en la región San Martín, Perú. La investigación incluyó cinco fincas situadas a 873, 1079, 1248, 1348 y 1430 metros sobre el nivel del mar, donde se evaluaron las características físicas y organolépticas del grano seco, así como el tiempo de secado. Si bien no se encontraron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros analizados, el secado mecánico sí mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. En este

método, los granos alcanzaron porcentajes de humedad de 11,3%, 11,2%, 11,1%, 11,3% y 11,4% en las respectivas altitudes, mientras que en el secado tradicional los valores fueron de 13,8%, 14,2%, 14,1%, 13,5% y 14%. Esto indica que los granos sometidos al secado mecánico fueron, en promedio, 2,68% más secos que aquellos procesados mediante el método tradicional. El secado mecánico no solo resultó en una mayor reducción de la humedad, sino que también obtuvo mejores puntuaciones en taza. Para evaluar la calidad organoléptica, se consideraron atributos como sabor, fragancia, acidez y cuerpo, según la cata realizada por especialistas. No se encontraron diferencias significativas entre las distintas altitudes estudiadas, pero sí se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los métodos de secado. En promedio, los granos secados mecánicamente obtuvieron puntuaciones de 83,60; 83,68; 82,73; 84,03 y 84,25 en las alturas de 873, 1079, 1248, 1348 y 1430 m.s.n.m, respectivamente. En contraste, los granos procesados con el método tradicional alcanzaron puntuaciones de 81,67; 81,73; 82,22; 82,25 y 82,47 en las mismas altitudes. Estos resultados sugieren que el secado mecánico no solo optimiza la reducción de humedad, sino que también mejora la calidad sensorial del café, reflejándose en una mejor calificación en taza en comparación con el secado tradicional (Guevara-Sánchez et al., 2019)

Otro estudio evaluó el impacto de distintos métodos de secado en la composición fenólica, la actividad antioxidante y la digestión in vitro de los granos de café verde. Se analizaron cinco métodos de secado: secado a temperatura ambiente (AD), secado con bomba de calor (HPSD), liofilización (FD), secado al vacío por microondas (MVD) y secado combinado de microondas y vacío. Entre los métodos analizados, el secado al vacío por microondas MVD se destacó por ser el más eficiente, reduciendo el tiempo de secado a solo 0,63 horas/kg con un consumo energético de 1,88 kWh/kg, mientras que el secado AD tomó 24 h/kg y el HPSD 10 h/kg. Además, este método preservó mayores concentraciones de compuestos fenólicos clave, como el ácido 5-cafeoilquínico (1,39 g/100 g peso seco en MVD vs. 1,04 g/100 g en AD y 1,08 g/100 g en HPSD) y el ácido 5-feruloilquínico (1,52 g/100 g en MVD vs. 1,09 g/100 g en AD y 1,14 g/100 g en HPSD). También presentó la mayor concentración de fenoles totales (5,98 g equivalentes de ácido gálico/100 g de peso seco) y una actividad antioxidante superior (Cheng et al., 2019).

La comparación de métodos de secado también ha incluido técnicas como el secado al aire ambiente, secado solar, secador con bomba de calor, secado con aire caliente y liofilización. Un estudio que utilizó nariz electrónica, lengua electrónica y cromatografía de gases-espectrometría de masas reveló que el secador con bomba de calor sobresale en la preservación de compuestos volátiles y propiedades sensoriales en los granos de café tostado. Los análisis de componentes principales permitieron diferenciar claramente las muestras según el método de secado empleado, ofreciendo una base teórica importante para el proceso de deshidratación de granos de café y productos agrícolas similares (Dong et al., 2019).

Finalmente, un estudio sobre productos agroalimentarios destacó que el uso de un secador asistido por bomba de calor reduce significativamente los costos y el consumo de energía. Se comprobó que la ubicación del compresor dentro del sistema de flujo de aire permitió un ahorro de 213 W (7,53%) gracias a la transferencia de calor por convección y radiación. Con una velocidad del aire de 1,2 m/s, el secador disminuyó en 236 W (8,34%) la energía necesaria para

calentar el aire. Además, combinaciones óptimas de velocidad, temperatura y área superficial del compresor lograron una transferencia de calor máxima de 415 W (14,67% del total). Este sistema modificado demostró mayor eficiencia energética frente a métodos convencionales. Este estudio, Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios, mostro valores registrados tales como: SMER entre 0,294 y 0,929 kg/kWh, SEC entre 1,08 y 3,40 kWh/kg, y una eficiencia de secado (DE) del 64,20 al 71,67%, lo que refleja un uso más eficiente de la energía y una reducción del consumo en el proceso de secado (Gómez-Daza, 2023)

6. Marco teórico

6.1. Café Arábica (*Coffea Arábica*)

El café pertenece a la familia de las Rubiáceas (*Rubiaceae*), un grupo que comprende alrededor de 500 géneros y más de 6.000 especies, en su mayoría árboles y arbustos tropicales. Dentro del género *Coffea* se encuentran más de 100 especies, todas originarias de África tropical y de algunas islas del Océano Índico, como Madagascar. Las dos especies más relevantes desde el punto de vista comercial son *Coffea arabica L*. (café arábico) y *Coffea canephora Pierre ex Froehner* (café robusta) (Rojo, 2014).

La especie *Coffea arábica* fue descrita por primera vez en 1753 por Linneo. Es un arbusto de gran tamaño, alcanzando aproximadamente 5 metros de altura, con hojas ovaladas de un verde oscuro y brillante. La floración se produce después de la temporada de lluvias, con flores blancas y fragancia dulce, que se agrupan en racimos. Sus frutos, inicialmente verdes y ovalados, adquieren un color rojo al madurar en un periodo de 7 a 9 meses. Cada fruto suele contener dos semillas planas y alargadas, comúnmente conocidas como granos de café. Esta especie se cultiva ampliamente en Latinoamérica, África Central y Oriental, India e Indonesia (Rojo, 2014).

Las principales regiones productoras de café incluyen Brasil, Colombia, México, Etiopía, El Salvador, Costa Rica, Honduras, Indonesia, Guatemala, Costa de Marfil, Angola, Jamaica, Uganda, India, Filipinas, Camerún, Camboya y China. A pesar de la amplia distribución del cultivo, este se concentra principalmente en los trópicos americanos, siendo Brasil el mayor productor, con una preponderancia en la exportación de café de tipo duro (Rojo, 2014). Las exportaciones totales café de todos los países exportadores se estimaron en más de 130 millones de sacos de 60 kg durante el año cafetero 2021/22, en comparación con 74,5 millones en 1990/91 y 42 millones de sacos en 1964/65. Entre los años cafeteros 1990/91 y 2021/22, las exportaciones totales de los países exportadores aumentaron en promedio 2.0% anual. El valor total de las exportaciones en el año cafetero 2021/22 alcanzó los 28.500 millones de dólares, el nivel más alto registrado (ICO & UNIDO, 2024).

Los cafés suaves, por otro lado, son exportados por casi todos los países de América, destacándose especialmente el café de Colombia, reconocido a nivel mundial por su calidad

con valores altos de acidez y aroma (Rojo, 2014). En 2023 la producción en Colombia fue de 11,3 millones de sacos de 60kg de café verde, 2,4% más frente a 2022. En el mismo periodo, el consumo de café en Colombia fue de 2,2 millones de sacos 1,3% menos que en 2022. En 2023 las exportaciones alcanzaron 10,6 millones de sacos de 60 kg, 7,3% menos que el año anterior. Su valor alcanzó los 3,3 billones de dólares, 27,3% menos que al cierre de 2022. Las importaciones fueron 1,6 millones de sacos, 35,8% menos que hace un año (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2023).

La calidad del café colombiano proviene de las variedades de *Coffea arabica* cultivadas en el país, así como de factores como la ubicación geográfica, las condiciones climáticas de las zonas cafeteras, las prácticas de cultivo, la recolección de granos maduros y el proceso de beneficio húmedo. Estas cualidades del café "100% colombiano" hacen que sea altamente valorado en el mercado internacional de cafés especiales, no solo por su origen sino también por sus excepcionales características organolépticas (Puerta-Quintero, 2000).

6.1.1. Composición nutricional

El café, químicamente se compone de agua y materia seca. La materia seca de los granos de café almendra está constituida por minerales y por sustancias orgánicas como los carbohidratos, lípidos, proteínas, alcaloides, así como por ácidos carboxílicos y fenólicos y por compuestos volátiles que dan el aroma a la almendra (Henao, 2016)

Un grano de café contiene normalmente un 34% de celulosa, un 30% de azúcares, un 11% de proteínas, de un 6 a un 13% de agua, y entre un 2 y un 15% de materia grasa. Otros componentes destacables son minerales, como el potasio, calcio, magnesio y fósforo, ácidos orgánicos (cafeilquínicos o clorogénicos) y alcaloides, como la cafeína (1-2.5%) y la trigonelina (Rojo, 2014). No obstante autores como Gómez-Merino et al. (2018), también describen la composición nutricional de los granos de café arábica en base seca con humedad del 5 a 8%, materia orgánica del 90 a 95%, cenizas de 3 a 5%, proteínas de 12 a 15%, carbohidratos de 40 a 60%, azúcares libres de 4 a 9%, grasas de 10 a 15% y fibra de 15 a 18%.

A continuación, se describe la composición química de los granos de café según una investigación de Largo (2020).

Agua: En promedio el contenido de agua varia de un 54 a 56 % (base húmeda).

Carbohidratos: Los carbohidratos (polisacáridos, oligosacáridos y monosacáridos) del café constituyen un 59-61% del peso seco. Los carbohidratos junto con los aminoácidos son precursores de la reacción de Maillard en la cual se desarrollan el color y compuestos aromáticos. La sacarosa es el carbohidrato predominante en el café verde con una concentración de hasta 90 mg/g en café arabica y 45 mg/g en robusta, glucosa entre (0,01-0,45% y 0,01-0,56%) y fructosa entre (0,02-0,4% y 0,2-0,55%) para C. arábica y C. canephora respectivamente.

Lípidos: La fracción lipídica se encuentra en su mayoría alojada al interior de las células en el endospermo de los granos del café. Existe una marcada diferencia entre el contenido total de lípidos entre las especies C. arábica y C. canephora. alrededor del 15% en C. arábica y 10 % en C. canephora. Los triacilglicéridos presentes en el aceite del café están formados principalmente por los ácidos grasos; mirístico, palmítico, esteárico, oleico, linoleico, araquidónico y eicosanoico.

Proteínas, aminoácidos libres y péptidos: Estos compuestos nitrogenados, donde se excluyen la cafeína y trigonelina representan el 11.2% de la composición química del endospermo del café (Farah, 2012). Varían para C. arábica y C. canephora; aminoácidos libres entre (0,27-0,5% y 0,35-0,6%), péptidos (8,7-9,6% y 9,2-9,7%) y proteínas (0,34-0,95% y 0,30-0,59%) respectivamente. Las albuminas y globulinas son las proteínas mayoritarias y el ácido glutámico, asparagina y acido aspártico los principales aminoácidos libres.

Alcaloides: La cafeína es el alcaloide principal en los granos de café, existe diferencia en la concentración según la especie de café. El contenido de este alcaloide en C. canephora es 2% y en C. arábica 1%. La concentración trigonelina en el endospermo de café puede variar de (0,8–1,05%) y (0,3–0,7%) en C. arábica y C. canephora respectivamente. La cafeína y la trigonelina están relacionadas con la formación de productos como los furanos, pirazinas, alquilpiridinas y pirroles, que aportan al sabor de la bebida del café.

Ácidos clorogénicos: Los ácidos clorogénicos (CGAs) son compuestos fenólicos que pueden alcanzar hasta el 10% de la materia seca del endospermo del grano de café verde (5-7,5% en C. arábica y 7-10% en C. canephora). A medida que la cereza del café madura en el árbol la concentración de los CGAs en el endospermo del café disminuye. Principalmente se destacan el ácido dicafeoilquínico, ácido cafeoilquínico, ácido pcumaroilquínico, ácido feruloilquínico, y el ácido quínico formado por diesteres mixtos de ácidos cafeico y ferúlico, se asocia sensorialmente la sensación de astringencia a los ácidos clorogénicos.

Ácidos alifáticos: Se han identificado ocho ácidos alifáticos en el café verde; cítrico, málico, acético, ascórbico, succínico, láctico, oxálico y tartárico. Se reportan del 2–2,9% y 1,3–2,2% (peso seco) de los ácidos (cítrico, málico y químico) en los granos verdes C. arábica y C. canephora respectivamente.

Compuestos aromáticos: Se han encontrado cerca de 200 compuestos volátiles de diferente naturaleza química como hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos, ésteres, lactonas, nitrógeno y compuestos azufrados, éteres, fenoles, furanos y compuestos halogenados; estos compuestos contribuyen al olor característico del café verde y pueden incluso conservarse y aportar sabor y olor al café tostado.

6.2. Usos posteriores de los subproductos del café

En los países productores de café, más del 90 % de la biomasa de las cerezas de café termina como Residuos del procesamiento del café (CPW) durante el procesamiento del mismo, principalmente en forma de pulpa, mucílago, pergamino o cáscara de café, según el método de procesamiento elegido. En el caso de una gestión insuficiente de los residuos, el CPW podría contribuir a la contaminación del agua, el suelo y el aire, lo que pone de manifiesto la necesidad de que las industrias de procesamiento de café tomen medidas para hacer frente a este desafío. Se alienta a las industrias de procesamiento de café a adoptar los principios de la economía circular e implementar iniciativas sostenibles con el fin de mitigar las consecuencias ambientales respectivas (Tsigkou et al., 2025).

Ordoñez & Sepúlveda (2020), menciona que una alternativa para sustituir las materias primas maderables que se emplean en la fabricación del papel es el uso de residuos agrícolas provenientes de las cosechas del café y el plátano como fuentes de fibra; el epicarpio del café está compuesto químicamente por 10,8 a 23,8 % de celulosa y hasta 17,50% de lignina. Es decir que, estos residuos agrícolas tienen una composición fisicoquímica semejante a las materias primas maderables con las que se fabrica normalmente el papel. Cabe destacar que estos residuos cuentan con un alto potencial para ser aprovechados como materias primas en la producción de abono, combustible, etanol, medicinas y papel.

El estudio Elaboración de una bebida alcohólica usando subproductos del café, evaluó el potencial de la pulpa de café como materia prima para la producción de una bebida fermentada. Además de la pulpa, se mencionan otros subproductos del café, como el mucílago, la cascarilla y el pergamino, los cuales representan una fuente importante de compuestos bioactivos y pueden ser aprovechados en diferentes aplicaciones. Mediante un proceso de fermentación controlada, se obtuvo un producto con características sensoriales aceptables en términos de sabor, aroma y apariencia, lo que sugiere su viabilidad para el consumo humano. Este enfoque no solo permite valorizar los residuos generados en el procesamiento del café, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental y promueve un uso más eficiente de los recursos en la industria cafetera (Cortés & Ladino, 2016)

En un estudio realizado por Aiello-Mazzarri et al. (2019) se evaluó la producción de biodiésel a partir de borra de café, un residuo de la producción de café soluble o de la elaboración de café como bebida. El objetivo de este trabajo fue evaluar la producción de biodiésel a partir de las grasas extraídas de la borra de café, mediante un proceso de esterificación con H_2SO_4 y transesterificación con KOH. Los resultados mostraron que es posible obtener biodiésel de buena calidad a partir de borra de café, con un rendimiento de hasta el 96,66%. El biodiésel obtenido cumplió con los estándares de calidad establecidos por las normas ASTM D6751 y EN 14214, con excepción de la viscosidad cinemática, que fue ligeramente superior al límite establecido. El estudio concluyó que la borra de café es una materia prima prometedora para la producción de biodiésel, ya que es un residuo abundante, económico y con un alto contenido de grasas.

Dentro de los componentes con los que cuenta el café están la pulpa y el mucílago; estas biomasas constituyen los subproductos más abundantes del proceso de beneficio húmedo del

café y representan alrededor del 60% del peso del fruto fresco, lo que indica que casi la mitad son desechos orgánicos. El poco aprovechamiento que se le da a estos residuos orgánicos es una de las grandes problemáticas que presenta el territorio colombiano y la mayoría de los países agrícolas. La biomasa cubre un amplio espectro de materiales orgánicos, y por tal motivo, es considerada una mezcla compleja de polímeros de carbohidratos conocidos como celulosa, hemicelulosa y lignina. Por esta razón Ortiz García et al. (2020), evaluaron la biomasa residual (cereza) de café como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*, con el fin de otorgar un mayor valor agregado a estos residuos y así reducir su impacto ambiental.

Ahora bien, los residuos de café han mostrado un gran potencial en la remoción de metales pesados (cobre, plomo y cadmio) de soluciones acuosas a través del proceso de biosorción. La biosorción ha surgido como solución alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, debido a que los biosorbentes exhiben cierta selectividad por los metales pesados, además actúan bajo un amplio rango de condiciones fisicoquímicas (Dávila, 2012)

La capacidad de adsorción de las biomasas se debe a la potencial cantidad de compuestos orgánicos como polialginatos, peptidoglucanos, polisacáridos, flavonoides y entre otros los cuales son capaces de adsorber y/o intercambiar iones metálicos debido a sus grupos funcionales (aminos, hidroxilos, carboxílicos, fosfatos, etc.) que actúan como centros atrayentes de cationes. Por lo que el uso de biomasas como materiales adsorbentes satisface dos ámbitos importantes para la protección del medio ambiente: la reutilización de materiales de desecho y la descontaminación de aguas residuales. Dado este potencial, la propuesta de Dávila (2012) considera la biosorción como una alternativa viable y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, empleando residuos sólidos de café.

Ahora bien, en concordancia con lo descrito por Dávila (2012) y Pastrana & Mora (2017) analiza la eficacia del residuo de café molido como adsorbente en la remoción de mercurio en aguas contaminadas por fuentes artesanales e industriales. Este estudio subraya la importancia de abordar la toxicidad de los metales pesados, los cuales representan un riesgo significativo para el medio ambiente debido a su alta estabilidad química y resistencia a los procesos de biodegradación.

En el estudio de Tsigkou et al. (2025) se destaca la importancia de cerrar el ciclo y alcanzar la circularidad en la bioeconomía del café. Para lograrlo, es fundamental agregar valor a los residuos mediante estrategias efectivas de valorización. La principal meta sigue siendo reducir el impacto ambiental de los residuos generados en el procesamiento del café, lo que impulsa tanto a científicos como a responsables políticos a promover una economía circular en todas las agroindustrias, incluyendo la del café.

6.3. Defectos en la producción del café

Según la investigación hecha por Rojo (2014), el café es una planta tropical que prospera y requiere de condiciones ambientales específicas para su cultivo a escala comercial. Elementos como la temperatura, la precipitación, la luz solar, el viento y la composición del suelo son cruciales para su desarrollo, aunque las necesidades particulares pueden variar dependiendo de la variedad cultivada. Las condiciones de cultivo son de vital importancia, ya que influyen significativamente en la incidencia de enfermedades y en la capacidad de la planta para resistir o tolerar los daños que estas puedan causar.

El cambio en las condiciones climáticas y el incremento global de las temperaturas representan una de las amenazas más significativas para la producción mundial de café. Esta situación es particularmente preocupante en el caso de Coffea arabica, ya que esta especie no tolera temperaturas superiores a los 24°C. En general, cuando las temperaturas superan los 28°C, se presentan anormalidades que afectan la floración y disminuyen el rendimiento del cultivo. Por otro lado, las temperaturas bajas, inferiores a 7°C, afectan negativamente el desarrollo de las raíces, provocando malformaciones, especialmente en condiciones de fuertes fluctuaciones térmicas diarias.

Hay tres importantes enfermedades que han causado grandes estragos en las fincas cafeteras de todo el mundo y que hoy en día aún siguen causando gran destrucción. Una de ellas es la roya, que afecta a las hojas, otro es la antracnosis, que ataca el grano, y, por último, la traqueomicosis (Rojo, 2014)

La roya del café es causada por *Hemileia vastatrix Berk.* y *Br. (Basidiomycota, Uredinales).* Esta grave enfermedad, que afecta solamente a las hojas, ataca a los cafetos en las tierras bajas. Esto ha provocado que con el paso de los años su cultivo se haya visto relegado a las tierras altas. Los síntomas se caracterizan por manchas localizadas en el haz y en el envés de las hojas de color amarillo-anaranjado. La severidad de la infección se manifiesta con la defoliación de los cafetos afectados y ocurre principalmente durante el periodo de sequía, después de un largo periodo de lluvias intensas y temperaturas moderadas (Rivillas et al., 2017)

La enfermedad del grano del cafeto, de la baya del café o CBD *(coffee berry disease*), parece estar por el momento restringida al continente africano. También conocida con el nombre de antracnosis, afecta a los frutos verdes del café y tiene por agente causal a hongos del género *Colletotrichum* (Ascomycota, Glomerellaceae), como *C. coffeanum, C. kahawae* y *C. gloeosporioides.* Este patógeno requiere un exigente control químico y aún no se conocen cultivares resistentes a todos los aislamientos del patógeno (Rojo, 2014)

Respecto a *Fusarium xylarioides* (Ascomycota, Nectriaceae) o la traqueomicosis, el patógeno fue descrito por primera vez en 1948, en el Congo. Su gravedad radica en que tapona los haces vasculares del árbol, lo que provoca su muerte a los pocos meses (Rojo, 2014)

Así mismo en el estudio hecho por Rojo (2014) se mencionan otras enfermedades que pueden afectar al café y son las siguientes:

- La gotera o enfermedad americana del cafeto, está causada por *Mycena citricolor* (*Basidiomycota, Tricholomataceae).* El patógeno afecta principalmente a las hojas, donde desarrolla lesiones circulares. Su aparición está asociada a un exceso de humedad y de sombra, así como a la presencia de temperaturas suaves.

- El mal de hilachas, causado por *Corticium koleroga (Basidiomycota, Corticiaceae),* provoca necrosis del fruto y la aparición de moho en tallos y hojas. Suele desarrollarse como consecuencia de un exceso de humedad y de sombra.

- La mancha de hierro o mancha cercospórica, causada por *Cercospora coffeicola (Ascomycota, Mycosphaerellaceae),* además de afectar a las hojas de plántulas de semillero, donde forma lesiones circulares y halos cloróticos, ataca el pericarpio de frutos verdes y maduros, afectando a la calidad del grano en lesiones avanzadas.

- Llagas radicales, causadas por *Rosellinia bunodes y R. pepo (Ascomycota, Xylariceae)*. Aparecen en suelos poco drenados y provocan la pudrición de la raíz y con el tiempo la muerte del individuo.

- Mal rosado, causado por *Corticium salmonicolor (Basidiomycota, Corticiaceae),* afecta gravemente a las ramas productivas, provocando momificación de frutos y eventualmente la muerte del árbol por anillamiento del tronco. Suele estar asociado a altas densidades de siembra, y a un exceso de humedad.

- Mancha aureolada o rosada, causada por *Pseudomonas Garçae*, destruye las hojas de la planta.

- Cancros, causados por *Myrothecium roridum* (Ascomycota, Hypocreomycetidae). Se desarrolla en las plantas del vivero y se inicia en el semillero. Los cafetos infectados muestran síntomas de cancros en las porciones bajas de los tallos y/o pudrición de la raíz pivotal.

- Respecto a las plagas, numerosos insectos pertenecientes a las familias *Coleoptera, Lepidoptera, Isoptera e Himenoptera*, perforan la madera del cafeto, dañando ramas y tallos. Pero sin duda, las plagas más graves son las que afectan a los frutos. La broca del café, causada por *Hypothenemus hampei*, es la más dañina. Estas enfermedades y plagas, además de causar un descenso en la producción, afectan a la distribución espacial y a la media de edad de las plantas por sección, como consecuencia, las labores de cultivo resultan menos eficientes y aumentan los costes de producción (Benavides et al., 2013)

6.4. Comercialización del café

El año cafetero 2021/22 fue un año de recuperación. A medida que la población de todo el mundo fue saliendo de los confinamientos de la Covid-19, la economía mundial se reactivó y

pasó de una contracción del 3,0% en 2020 a una expansión casi sin precedentes, del 6.0%, en 2021. Se calcula que el consumo mundial de café fue de 170,3 millones de sacos de 60 kg frente a 164,9 millones en el año cafetero 2020/21, un ascenso del 3,3%. Se cree también que el suministro bajó un 2,1% y fue de 167,2 millones de sacos frente a 170,7 millones. El precio indicativo compuesto de la OIC respondió positivamente al fortalecimiento de la economía y subió a 197,91 centavos de dólar estadounidense por libra en el año cafetero 2021/22 frente a 130,45 centavos en el año cafetero 2020/21 (ICO, 2022).

Se calcula que la producción total en el año cafetero 2021/22 fue de 167,2 millones de sacos, un descenso del 2,1% frente a los 170,83 millones del año cafetero anterior. La producción de arábica fue de 93,97 millones de sacos aproximadamente y la de robusta de 73,2 millones. En Asia y Oceanía la producción fue de alrededor de 51,4 millones de sacos, un aumento del 7,1%. En cambio, la producción de Sudamérica descendió un 7,6% y fue de 77,5 millones de sacos. La producción de México y América Central descendió alrededor del 3,5% y fue de 19,0 millones de sacos, y la de África descendió en el año cafetero 2021/22 0,3 puntos porcentuales y fue de 19,27 millones de sacos (ICO, 2022).

El consumo mundial de café fue de alrededor de 170,3 millones de sacos en 2021/22, un ascenso del 3,3%. El consumo de café de los Estados Unidos y de Canadá aumentó un 5,4% y fue de 31,9 millones de sacos en el año cafetero 2021/22, y el consumo de Europa fue de alrededor de 54,2 millones de sacos. El de Asia y Oceanía aumentó a 40,8 millones de sacos aproximadamente, frente a 39,66 millones en el año cafetero 2020/21. Se calcula que las tasas de crecimiento del consumo de café en México y América Central y en Sudamérica fueron del 0,3% y del 0,5%, y que el consumo respectivo fue de 5,4 millones de sacos y 26,72 millones. Los cálculos estimativos situaron el consumo de África en el año cafetero 2021/22 en 11,7 millones de sacos (ICO, 2022).

Las exportaciones mundiales de grano verde descendieron un 0,4% en el año cafetero 2021/22 y fueron de 128,97 millones de sacos frente a 129,52 millones en el año cafetero 2020/21. Brasil siguió siendo el mayor exportador del mundo y exportó 38,12 millones de sacos, lo que representó el 29,6% del total de exportaciones. Vietnam fue el segundo mayor exportador y exportó 28,19 millones de sacos, lo que representó el 21,9% del total de exportaciones de café del año cafetero 2021/22. En términos de regiones, Sudamérica continua como la mayor región exportadora de café con 55,31 millones de sacos en el año cafetero 2021/22, lo que representó el 42,9% del total mundial. La región de Asia y Oceanía fue la segunda mayor exportadora y exportó 53,85 millones de sacos, lo que representó el 34,0% del mercado. La región de México y América Central exportó 16,07 millones de sacos, lo que representó el 12,5% del total de exportaciones, y África exportó 13,74 millones, lo que representó el 10,7% del mercado (ICO, 2022).

6.5. Café de especialidad

El café de especialidad es aquel que se distingue por atributos sensoriales superiores y características únicas, siendo evaluado rigurosamente por profesionales certificados a través de sistemas internacionales de evaluación. Según la SCA, el café de especialidad debe alcanzar un puntaje superior a 80 en una escala de 100 puntos para ser considerado como tal, donde se

evalúan aspectos como sabor, aroma, acidez, cuerpo y posgusto (Specialty Coffee Association, 2024).

6.5.1. Clasificación de cafés especiales en Colombia

Aunque existen muchos tipos de cafés especiales y muchas formas de clasificarlos, el área encargada de los cafés especiales en la FNC los ha clasificado de la siguiente manera:

Cafés de origen

Cafés de alta calidad, que se venden con un sobreprecio, por el sitio en donde se producen. Provienen de una región o finca con cualidades únicas, debido a que crecen en sitios especiales y son vendidos al consumidor sin ser mezclados con cafés de otras calidades o con cafés de otros orígenes (Arcila et al., 2007). Estos tipos de café especial se dividen a su vez en tres grupos:

Cafés regionales

Son aquellos cafés que provienen de una región específica reconocida por sus cualidades particulares. Se le ofrecen al consumidor final puros, sin mezclar con productos de otros orígenes (Arcila et al., 2007)

Cafés Exóticos

Son cafés cultivados en zonas determinadas bajo condiciones excepcionales. Por tanto, poseen características sensoriales y organolépticas que permiten obtener una taza de altísima calidad (Arcila et al., 2007)

Café de finca

Cafés producidos en una sola finca, que provienen de un solo cultivo, tienen un beneficio centralizado y ofrecen un producto sobresaliente en calidad, la cual es consistente en el tiempo (Arcila et al., 2007)

Cafés sostenibles

Esta categoría de cafés especiales busca ejercer una supervisión estricta sobre los factores sociales, ambientales y económicos asociados con la producción de café, para garantizar el futuro de las personas y comunidades que lo cultivan. Estas comunidades tienen un serio compromiso con la protección del medio ambiente, la conservación de la biodiversidad de sus zonas y la promoción del llamado "mercado justo" con los países en vías de desarrollo (Henao, 2016)

Los cafés sostenibles involucran procesos de certificación y/o cumplimiento de códigos de conducta, los cuales se dividen en tres:

Cafés orgánicos

Son los cafés cultivados sin la utilización de productos agroquímicos como fungicidas, herbicidas, insecticidas y fertilizantes. Normalmente, se comercializan con una certificación expedida por una firma especializada, encargada de inspeccionar y vigilar las prácticas del cultivo, su proceso de trilla, almacenamiento y transporte. (Arcila et al., 2007). De otra manera también define la agricultura orgánica como un sistema de producción que mantiene y mejora la salud de los suelos, los ecosistemas y las personas. Se basa fundamentalmente en los procesos ecológicos, la biodiversidad y los ciclos adaptados a las condiciones locales, sin usar insumos que tengan efectos adversos. La agricultura orgánica combina tradición, innovación y ciencia para favorecer el medio ambiente y promover relaciones justas y buena calidad de vida para todos los que participen en ella.

El café orgánico se produce en suelos donde no hayan aplicado sustancias prohibidas (fertilizantes sintéticos, herbicidas, pesticidas, reguladores de crecimiento, fungicidas, etc.) por un periodo de al menos 3 años antes de obtener la certificación. Tanto los productores como los procesadores deben mantener registro detallado de los métodos y materiales utilizados, así como los planes para las prácticas empleadas. Para comercializarse como ecológicos, una organización de certificación externa inspecciona los métodos y materiales utilizados durante la producción y transformación sobre una base anual; la Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica (IFOAM) es la principal organización de apoyo al movimiento orgánico (Henao, 2016).

Café amigable con las aves o de sombra

Este café crece y se cultiva a la sombra de una cubierta arbórea, en contraste con las fincas cafeteras en las que el café se cultiva a plena exposición solar, o aquellas completamente tecnificadas que tienen muy pocos árboles o carecen de ellos totalmente (Arcila et al., 2007).

Café de precio justo o social

Son cafés producidos por pequeños productores asociados en cooperativas y que tienen un precio mínimo de compra garantizado. Las relaciones comerciales están basadas en el respeto y beneficio mutuo de las partes. Se valora el trabajo de los productores, las leyes laborales, la seguridad social, la salubridad y el respeto por la conservación de los recursos naturales (Arcila et al., 2007).

6.5.2. Specialty Coffee Association (SCA)

La SCA establece los estándares para definir y evaluar el café de especialidad a nivel mundial. Su misión es promover la excelencia en cada paso de la cadena de valor del café. En 2024, la

SCA introdujo un nuevo sistema de evaluación conocido como Coffee Value Assessment (CVA), que evalúa tanto atributos sensoriales como extrínsecos del café, tales como el origen, las certificaciones y el método de producción. Este sistema más completo y flexible refleja la evolución de los estándares de calidad del café en la industria (Specialty Coffee Association, 2024).

La rueda de sabores

La Rueda de Sabores del Catador de Café, desarrollada por la SCA, es una herramienta visual que permite a los catadores identificar y describir los sabores y aromas del café. Esta rueda es un estándar en la evaluación sensorial del café de especialidad y se utiliza para analizar las complejidades y el perfil de sabor de una muestra de café. El uso de esta rueda es esencial para estandarizar el lenguaje utilizado por los profesionales de la industria, facilitando la comparación entre lotes y orígenes. El proceso de secado es uno de los factores que más influye en el desarrollo de estos sabores y aromas. Un secado controlado, como el que se investiga en esta tesis, tiene un impacto directo en la calidad sensorial del café, permitiendo que se conserven y resalten los atributos positivos del grano, algo crítico para los productores de café de especialidad (Specialty Coffee Association, 2024).

6.5.3. Diferencias entre café de especialidad y café comercial

- Café de especialidad: Se caracteriza por ser trazable, es decir, se puede conocer su origen, los métodos de cultivo y procesamiento, y en general tiene una puntuación mínima de 80 sobre 100 según la escala de la SCA. Además, sus atributos sensoriales (sabor, aroma, cuerpo, acidez) son sobresalientes. Su producción se cuida desde el cultivo hasta el proceso de secado y tostado.

- Café comercial: Se produce en grandes volúmenes, con menos énfasis en la trazabilidad y sin rigurosos controles de calidad. Los métodos de secado y procesamiento tienden a ser más estándar, y el perfil sensorial no es tan prioritario como en el café de especialidad.

Tabla 1 Clasificación de bebidas de café mediante el método SCA (Specialty Coffee Association, 2024)

Puntaje SCA	Descripción	Clasificación
90 - 100	Café de especialidad de excelencia	
85 – 89,99	Café de especialidad muy bueno	Especial
80 – 84,99	Café de especialidad	
< 80	No considerado café de especialidad	No especial

6.6. Métodos de secado del café

6.6.1. Secado solar de café

El secado solar utiliza la radiación solar como fuente de energía, la radiación solar incrementa la temperatura superficial del grano lo que permite evaporar el agua contenida en los granos de café. El proceso de secado solar se puede clasificar en función de cómo se transfiere el calor al producto húmedo, lo que permite definir el diseño y operación del secador; el secado solar en invernadero se puede clasificar principalmente según el tipo de estructura, empleándose mayormente las estructuras de forma parabólica y tipo iglesia. El objetivo del secador de invernadero es aprovechar al máximo la radiación solar. Sin embargo, según el modo de transferencia de calor, se clasifican como secadores en modo pasivo y secadores en modo activo. Donde, el ingreso del aire al secador tipo invernadero se da por convección natural (modo pasivo) y por convección forzada (modo activo) (Largo, 2020).

Se realiza para garantizar una adecuada conservación de los granos de café durante el almacenamiento, reducir el contenido de humedad hasta un nivel adecuado para inhibir el desarrollo de hongos y evitar que el grano sufra daños en su aspecto físico y composición química, permitiendo obtener un producto estable que conserve su calidad por amplios periodos de tiempo. Para la reducción de la humedad en los granos de café se utilizan dos sistemas: el secado con exposición directa al sol y bajo sistemas de cobertura plástica (marquesinas) (Largo, 2020).

6.6.1.1. Secado solar con exposición directa al sol

Aprovecha la radiación solar global y la entalpía del aire para el secado, el tiempo de secado puede ser de 5 a 21 días dependiendo de las condiciones climatológicas de la región. Es el método más difundido en países en vía de desarrollo y el más económico (Largo, 2020).

6.6.1.2. Secado solar en marquesina

Se utiliza una estructura con cobertura plástica “marquesina” para aprovechar al máximo la energía del sol, donde al interior de la estructura se da el efecto invernadero. El proceso de secado puede durar de 3 a 10 días, dependiendo de condiciones climáticas. Dentro de estos tipos de estructuras se destacan, los secadores solares parabólicos, secadores tipo túnel y paseras solares (Largo, 2020)

6.6.2. Secado mecánico del café

El proceso de secado por convección forzada de aire caliente que atraviesa un lecho conformado por granos de café es conocido en el gremio cafetero como secado mecánico. Existen muchos modelos y tamaños para realizar el secado mecánico del café, en Colombia

son muy empleados los secadores de capa estática, ya que son fáciles de operar y su construcción puede ser económica comparados con otras tecnologías de secado. Los secadores de capa estática tardan en las cámaras de presecado y secado en promedio de 25 a 30 h en llevar el café lavado y escurrido hasta café pergamino para una temperatura de secado de 50°C con relación al espesor de la capa (0,1 – 0,4 m) del lecho conformado por los granos de café y caudal de aire (20 – 40 $m^3/m^1 \cdot m^2$) (Parra Coronado et al., 2017).

Está el secador mecánico tipo Guardiola, éstos son secadores de tambores rotatorios metálicos, que giran a muy bajas rotaciones y se fabrican de todos los tamaños, según los requerimientos de las fincas. En este secador el aire caliente proviene del ventilador y de un generador de aire caliente, y es conducido por un tubo perforado concéntrico con el eje del tambor, es así como el aire atraviesa radialmente el cilindro secador y encuentra el grano de café en su camino, entregando parte de su energía sensible y transportando la humedad desprendida del café al medio ambiente al atravesar el cilindro exterior que también es perforado. El café es colocado inicialmente dentro del cilindro, sin llenarlo completamente, de forma que al girar el tambor y ayudado por unos cangilones incrustados en sus paredes internas, levantan el café y lo dejan caer desde la altura máxima para que los granos y el aire caliente estén en contacto (Parra et al, 2017). Una ventaja de esta tecnología de secado es que permite obtener café pergamino con un contenido de humedad uniforme en todos los granos de café, su principal desventaja es la baja eficiencia térmica que incrementa los costos de operación del secado, por lo que gradualmente se fueron sustituyendo por secadores de capa estática con sus diversas modificaciones tales como la inclusión de inversión de flujos de aire (Largo, 2020).

El secador estático de una cámara de secado, este secador se caracteriza porque el flujo de aire caliente atraviesa el lecho conformado por los granos de café. Para obtener una mayor uniformidad en el contenido de humedad del grano, el flujo del aire se invierte cada 6 a 12 horas hasta obtener el contenido de humedad final. Para secadores de capa estática el flujo mínimo recomendado es de 25 $m^3/m^1 \cdot m^2$de café pergamino seco (66 m^3/mt CPS), temperatura máxima del aire de secado de 50 °C y el espesor de la capa de granos de 40 cm (Largo, 2020).

El silo secador de dos pisos, conocido también como “silo secador vertical”. En este secador la cámara de pre-secado está localizada sobre la cámara de secado, el aire que sale de la cámara inferior pasa a la cámara superior realizando el pre-secado; cuando el café de la cámara inferior ha alcanzado el contenido de humedad deseado se retira y el café que se encuentra en la cámara superior se deja caer a la cámara inferior abriendo una compuerta situada en el piso del segundo nivel, donde el café termina su proceso de secado (Largo, 2020).

Para obtener una mayor uniformidad en la humedad final del café pergamino seco se adicionó un nuevo piso al secador vertical de dos pisos, dando paso al secador de tres pisos o tres capas con inversión del flujo de aire de secado solo en el piso inferior. Este último diseño de cámaras de secado es económico y permite obtener un producto con una humedad uniforme con capas de café de 25 cm de espesor por cámara de secado y un caudal de aire de 100 m^3/mt CPS (Largo, 2020).

6.6.3. Secado asistido por bomba de calor

6.6.3.1. Secado convencional asistido por bomba de calor

El secador asistido por bomba de calor (SBC), es una coexistencia de dos sistemas termodinámicos, el secador y la bomba de calor. Todos los secadores que usan la convección como modo primario de entrada de calor al secador pueden adaptarse a una bomba de calor con el diseño apropiado (Gómez-Daza, 2023). Los secadores de bomba de calor se han empleado en la industria de alimentos para el secado de frutas y vegetales en variados países (Gómez-Daza & Ochoa-Martínez, 2012)

Una bomba de calor es esencialmente una máquina termodinámica formada por un circuito frigorífico clásico (compresor, condensador, sistema de expansión y evaporador) del que se aprovecha la energía calorífica cedida por el condensador y la que se absorbe en el evaporador del aire (Muñoz & Vivas, 2015). El funcionamiento de una bomba de calor empieza con el compresor, el cual eleva la presión del fluido de trabajo y por ende su temperatura, este pasa al condensador en forma de gas sobrecalentado donde transferirá su energía térmica (entrega calor), el fluido de trabajo pierde energía y continua como un líquido subenfriado hacia la válvula de expansión donde sale como una mezcla de líquida y gas, luego entra al evaporador, donde gana energía (absorbe calor) hasta llegar al estado vapor saturado, el cual será enviado al compresor donde el ciclo se repite (Díaz, 2018)

El secado asistido por bomba de calor presenta ventajas comparativas con respecto a otros secadores en cuanto a eficiencia energética, secado continuo de alimentos y reducción de los tiempos de secado, debido a los altos coeficientes de rendimiento que presenta esta tecnología. Así mismo el proceso de secado asistido por bomba de calor ayuda a preservar en buenas condiciones el producto ayudando a mejorar la producción ya que se pueden hacer cosechas tempranas, almacenar más tiempo sin que se pierdan las propiedades nutricionales de algunos productos y reducir el espacio de almacenamiento. Debido a su elevada eficiencia energética, las bombas de calor han sido empleadas desde la década de 1970 principalmente en las industrias de la madera y en el secado de alimentos, y actualmente se están realizando investigaciones para expandir su aplicación a otros sectores (Díaz, 2018)

No obstante, la principal ventaja del secador asistido por bomba de calor es que puede proporcionar propiedades controladas del aire de secado, la humedad y la temperatura, por lo que puede ser más adecuado para el secado de productos sensibles a la humedad. El secador asistido por bomba de calor puede funcionar en modo de ciclo abierto o en modo de ciclo cerrado (la energía del aire de salida del secador se puede utilizar mediante recirculación) dependiendo de las condiciones ambientales (Singh et al., 2020b).

6.6.3.2. Secado modificado asistido por bomba de calor

Este equipo introduce dos innovaciones clave en comparación con un secador convencional asistido por bomba de calor. Primero, el compresor del ciclo de refrigeración ha sido

estratégicamente posicionado dentro del circuito de flujo de aire. Segundo, el sistema de control ha sido configurado para funcionar exclusivamente con base en la humedad relativa, en lugar de depender de la regulación de la temperatura o de una combinación simultánea de temperatura y humedad relativa. Las diferencias entre un secador asistido por bomba de calor convencional y el modificado se ilustran en las figuras 1 y 2, respectivamente.

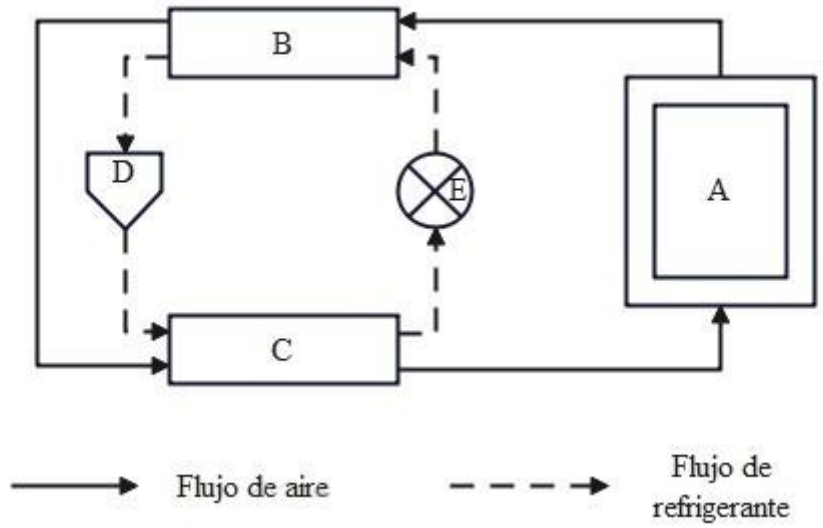


Figura 1 *Secado convencional asistido por bomba de calor* *Basado en la información de "Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios", Por Gómez-Daza (2023), *Ing-Nova*, 2(2)

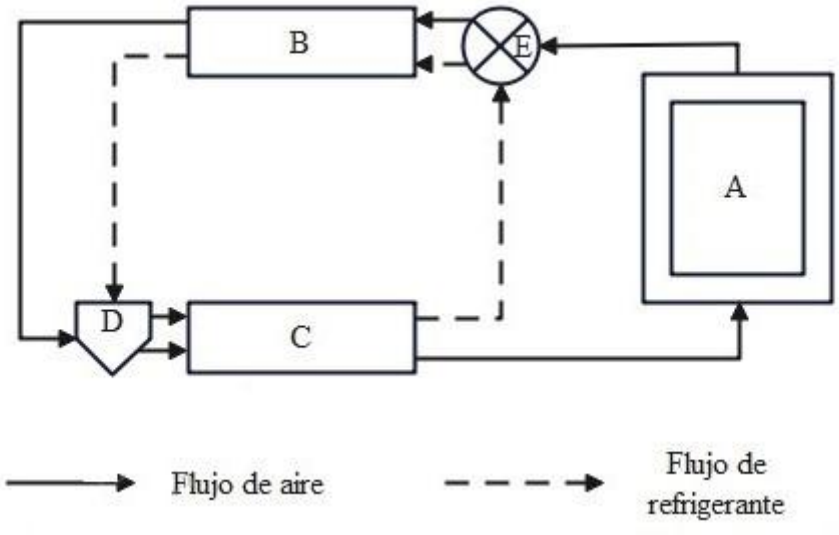


Figura 2 *Secado modificado asistido por bomba de calor*. *Basado en la información de "Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios", Por Gómez-Daza (2023), *Ing-Nova*, 2(2)

En las figuras 1 y 2; las partes se identifican de la siguiente manera: A corresponde a la cámara de secado, B al evaporador, C al condensador, D al compresor, y E a la válvula de expansión.

Según lo planteado por Gómez-Daza (2023), la ubicación del compresor dentro del sistema de flujo de aire genera un beneficio significativo. Bajo condiciones controladas y suponiendo velocidades mínimas del flujo de aire, se identificó una contribución de 213 W de calor generado por el compresor a través de convección natural y radiación, representando un aporte del 7,53%. Al mantener una velocidad del aire de 1,2 m/s, se logró una reducción de 236 W en el calor necesario para elevar la temperatura del aire, lo que corresponde a una contribución del 8,34%. Además, se demostró que ciertas combinaciones de velocidad del aire, temperatura y área superficial del compresor pueden optimizar la transferencia de calor, alcanzando una ganancia máxima de 415 W, equivalente al 14,67% del calor total. Estas ganancias térmicas del compresor se reflejan en una disminución del calor requerido en la unidad condensadora.

Sistema de refrigeración y control de humedad: análisis técnico y funcionamiento

De acuerdo con el Manual del usuario para secador de bomba de calor con circuito de operación cerrado-Referencia DSBC1, realizado por Dartico S.A.S (2009). El sistema de refrigeración evaluado se compone de una unidad condensadora hermética Tecumseh de ½ HP, diseñada para operar con un suministro eléctrico de 220 voltios en una configuración monofásica, utilizando el refrigerante R-22. El sistema incorpora un condensador con una capacidad de 8000 BTU, complementado por un ventilador centrífugo de 1/6 HP, que permite la regulación de velocidades. La operación del sistema alcanza una temperatura máxima de 55 °C. El evaporador está equipado con una válvula de expansión ajustable, lo que posibilita aumentar el diferencial de temperatura para mejorar la extracción de humedad del aire.
El funcionamiento del sistema se controla mediante una válvula solenoide que se activa a través de un interruptor ON/OFF. Adicionalmente, el sistema cuenta con presostatos que monitorizan tanto la baja como la alta presión. El compresor se gestiona a través de un controlador electrónico, que mantiene la humedad relativa en un nivel preestablecido del 4%, utilizando un manómetro MT/530 Súper para su control.

Se implementan cinco sistemas diferentes para la medición de temperatura y humedad relativa:

a. Termohigrómetro Analógico: Ubicado en el retorno de la cabina de deshidratación para medir las condiciones del aire que retorna.
b. Termohigrómetro Analógico: Instalado dentro de la cabina de refrigeración, antes de que el aire pase por el condensador.
c. Termohigrómetro Digital: Situado en la entrada de la cabina de deshidratación, regula el setpoint del sistema.
d. Termómetro Digital: Monitoriza la temperatura de evaporación.
e. Termómetro Digital: Supervisa la temperatura dentro del sistema de refrigeración.

Para equilibrar la carga térmica entre el evaporador y la cantidad de humedad extraída en la salida de aire, se mantiene una tasa de flujo de aire constante al 78%, con un caudal de 0.54 m^3/s. El diseño de la cabina está optimizado para distribuir el aire uniformemente a través, de las bandejas, lo que mejora la eficiencia del proceso de secado.

Componentes del equipo

A. Circuito Frigorífico

Este sistema está constituido por una unidad condensadora y un evaporador, que forman un circuito cerrado de aire. A medida que el aire sale del condensador, su temperatura se eleva a 55 °C. Este aire caliente pasa por la cabina de deshidratación, donde absorbe la humedad del producto. La humedad se condensa cuando el aire atraviesa el serpentín del evaporador, donde el refrigerante R-22 cambia de estado de líquido a gas, generando energía cinética. El agua condensada se elimina mediante un sifón.

B. Válvula de Expansión

Encargada de transformar el refrigerante de líquido a gas, la válvula de expansión reduce la presión de 220 psi a 30 psi, con la regulación precisa proporcionada por un bulbo de temperatura.

C. Compresor

El sistema cuenta con un compresor de tipo reciprocante de pistón, operando a 220 voltios monofásicos, con una capacidad de ½ HP. Este equipo es de la marca Tecumseh, modelo francés CAJ9460T, y utiliza refrigerante R-22.

D. Funcionamiento del Compresor

El compresor se activa según los parámetros establecidos por el controlador electrónico, basados en el setpoint de temperatura. Durante la compresión del gas refrigerante, la presión se incrementa de 30 psi a 220 psi, utilizando el calor generado para el funcionamiento del circuito cerrado del aire.

E. Condensador

El condensador es responsable de convertir el refrigerante sobrecalentado de estado gaseoso a líquido, generando un calor equivalente a 10000 BTU/h. En este proceso, la temperatura del aire se incrementa de 10 °C a 55 °C, eliminando simultáneamente la humedad.

F. Depósito de Líquido

Este componente es un tanque equipado con válvulas de servicio, que recibe el refrigerante ya condensado y asegura su suministro adecuado a la válvula de expansión para el cambio de estado a gas.

G. Cabina de Deshidratación

La cabina de deshidratación es una cámara de secado que alberga cinco bandejas de 0.36 x 0.36 cm, con una separación de 15 cm entre cada una. Esta cabina permite la dirección del flujo de aire tanto en sentido horizontal a través de las bandejas como en sentido vertical desde abajo

hacia arriba, con la posibilidad de ajustar la dirección y el flujo mediante cinco dámperes. El control del sistema incluye un tablero con un controlador electrónico dedicado tanto a la refrigeración como a la regulación de la humedad relativa, ambos equipados con displays luminosos. Además, en varios puntos de la cabina se han colocado termómetros análogos para el seguimiento constante de la temperatura. El sistema de ventilación utiliza un blower centrífugo con tres velocidades ajustables, impulsado por un motor de 1/6 HP, que opera a 220 voltios, conectado a un eje de ½ pulgada. El manejo del aire dentro del circuito cerrado se optimiza mediante una campana y un mueble especialmente diseñado para este propósito.

Funcionamiento del equipo

a. Regulación de la Temperatura

En el caso de la deshidratación por refrigeración, la temperatura del sistema solo puede ajustarse mediante el estrangulamiento manual de la válvula de expansión, un procedimiento que debe ser realizado exclusivamente por un técnico especializado. Si la deshidratación se realiza mediante calefacción, un presostato manual permite ajustar la temperatura según las necesidades del proceso.

b. Regulación de la Humedad

La humedad se regula para mantener un nivel preciso del 4%. Cuando la humedad alcanza este nivel, el controlador electrónico cierra la válvula solenoide, recoge el refrigerante R-22 y el sistema se apaga mediante un presostato. El nivel de humedad se puede ajustar modificando los parámetros en el controlador, seleccionando un rango de humedad relativa. El sistema viene con una configuración preestablecida de fábrica, y el manual del controlador proporciona detalles sobre el significado de cada parámetro y cómo ajustarlos según sea necesario.

c. Medición de la Velocidad del Aire

La velocidad del aire se mide utilizando un anemómetro digital portátil, que permite realizar mediciones en varios puntos dentro de la cabina, asegurando un control adecuado del proceso de deshidratación.

6.7. Factores clave en el secado del café

6.7.1. Humedad relativa

La humedad relativa es un parámetro crucial que indica el grado de saturación de la atmósfera en relación con la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura específica. Se define como la relación entre la presión de vapor actual del agua y la presión de vapor saturante a esa temperatura, expresada en porcentaje. Un porcentaje más alto indica una atmósfera más saturada con vapor de agua(Escobar & Pantoja De La Cruz, 2016). A una temperatura fija, el aire puede absorber vapor de agua hasta alcanzar su punto de saturación, que corresponde al 100% de humedad relativa. Cuando la temperatura aumenta, la capacidad del aire para retener humedad también aumenta, lo que provoca una disminución en

la humedad relativa. Esta relación se debe a que la humedad relativa es la proporción entre la presión de vapor de agua en el aire y la presión de vapor que el aire puede mantener cuando está saturado a esa temperatura. Así, la humedad relativa no solo refleja la cantidad de vapor de agua en el aire, sino también la temperatura, ya que la cantidad de agua necesaria para saturar el aire cambia con la temperatura.

Durante un proceso de secado, la humedad relativa del aire puede aumentar debido a la evaporación del vapor de agua del material húmedo y al enfriamiento del aire. Esto significa que, para continuar secando el material de manera efectiva, es necesario reducir la humedad relativa del aire. Esto se puede lograr mediante el uso de sistemas de aire acondicionado, que permiten mantener la eficiencia del proceso de secado al evitar que el aire se sature demasiado rápido (Madrid, 2017).

Los granos de café tienen la capacidad de absorber o liberar humedad en función de las condiciones de temperatura y humedad relativa del entorno. Su contenido de humedad varía según el ambiente, lo que puede resultar en adsorción (absorción de humedad) o desorción (liberación de humedad) dependiendo de las condiciones específicas (Puerta, 2013).

La humedad relativa del aire es un factor clave en la rapidez del secado del producto. A medida que disminuye la humedad relativa, el aire puede absorber más humedad del producto, acelerando así el proceso de secado (Quintanar & Roa, 2017).

6.7.2. Temperatura

El control de la temperatura durante el secado es fundamental, ya que se han demostrado daños estructurales en la semilla cuando se utilizan temperaturas demasiado altas lo que lleva a un deterioro de la calidad de la bebida por fugas de lípidos que pueden oxidarse y causar sabores a rancio; a su vez cuando se utilizan temperaturas demasiado bajas pueden ocurrir sobre fermentaciones indeseadas que generan sabores a sucio y a vinagre (Henao, 2016).

La temperatura desempeña un papel crucial en la postcosecha y almacenamiento del café, ya que influye en la actividad de agua (aw) y en la proliferación de hongos toxigénicos. Un control adecuado de la temperatura y la humedad es fundamental para evitar el desarrollo de microorganismos no deseados. Niveles altos de humedad y actividad de agua ($aw \geq 0,95$) favorecen el crecimiento de hongos y levaduras que compiten con los productores de ocratoxina A (OTA), mientras que valores superiores al 53% de humedad y 0,7 de aw crean condiciones óptimas para la producción de micotoxinas. La presencia de estos hongos compromete la calidad del café, generando deterioro, sabores desagradables y la acumulación de compuestos tóxicos como la OTA, clasificada como un compuesto potencialmente cancerígeno. Por ello, el secado es un proceso fundamental, ya que reduce la humedad y la actividad de agua, minimizando el riesgo de contaminación del grano y asegurando su inocuidad (Pabón & Osorio, 2019)

Para lograr un secado eficiente sin comprometer la calidad del café, es fundamental controlar diversas variables. No obstante, en el secado mecánico, ciertas prácticas pueden impactar negativamente el producto final, como el uso de temperaturas superiores a 50°C, las cuales pueden causar daños estructurales en el grano, deteriorar su calidad y ocasionar defectos como los granos cristalizados. Es importante considerar que la temperatura del aire suele ser mayor que la del grano y, en muchos secadores, durante la fase final del proceso, los granos pueden alcanzar la misma temperatura del aire, lo que acelera la deshidratación y puede generar fisuras internas, afectando su integridad. Por otro lado, el uso de temperaturas de secado demasiado bajas prolonga el tiempo de secado, lo que puede deteriorar la calidad del café, ya que un alto contenido de humedad favorece el desarrollo de microorganismos que producen compuestos no deseados, como el ácido butírico y propiónico (Henao, 2016), igual modo si no se logra reducir la humedad a los niveles adecuados, los granos pueden presentar una textura floja (de apariencia oscura y blanda), con un mayor contenido de agua, lo que favorece la aparición de sabores indeseados, como notas terrosas y amaderadas, que afectan tanto el perfil de sabor como el residual de la bebida (Pabón & Osorio, 2024)

6.7.3. Velocidad del aire

La cantidad de aire que debe circular por el espacio intergranular es importante, pues de este depende la transferencia de calor necesaria para producir la evaporación y retirar el vapor de agua de los granos. El caudal específico de aire es de vital importancia para el éxito de la operación de secado. Si es insuficiente, se incrementa el tiempo de secado y los granos presentan alta variación en el contenido final de humedad. Por otro lado, si el caudal es mayor de lo necesario, se incrementarán los costos del secado, debido a una potencia superior del ventilador y, por consiguiente, un mayor consumo de energía (Pabón & Osorio, 2019). La distribución uniforme del flujo de aire es importante porque determina la eficiencia y homogeneidad del producto seco (Siagian et al., 2018)

El flujo de aire en el secado del café es otro de los factores críticos que puede afectar la calidad. Dependiendo del flujo el proceso será eficiente energéticamente o no, ya que éste es el encargado de suministrar la energía térmica a las capas de café para que el proceso de evaporación se inicie (Gutiérrez-Flórez & Copete-López, 2009)

Si el flujo de aire es insuficiente, el tiempo de secado se prolonga y los granos presentan una alta variabilidad en su contenido final de humedad. Por otro lado, si el caudal de aire supera lo necesario, se incrementará el consumo energético tanto para accionar los ventiladores como para el calentamiento del aire, lo que repercutirá negativamente en los costos del proceso de secado, por ende, un flujo de aire adecuado que atraviese la masa de café durante el proceso de secado es crucial para reducir la heterogeneidad en la humedad de los granos, que puede surgir con el uso de esta tecnología (Parra-Coronado et al., 2008)

7. Materiales y métodos

7.1. Diseño de la investigación

El presente estudio se basa en un diseño con enfoques cuantitativos para evaluar el proceso de secado del café y su impacto en la calidad del producto final. Este enfoque tiene como objetivo el obtener una comprensión más profunda tanto de los aspectos técnicos del secado como de los atributos sensoriales del café.

Los aspectos cuantitativos incluyen:

- Cinética del secado: Se monitoreó la tasa de pérdida de humedad en función del tiempo.
- Medición de color: Se utilizó el sistema CIELab para evaluar cambios en la apariencia visual del café.
- Análisis sensorial: Un panel de tres (3) catadores certificados por la Specialty Coffee Association (SCA) evaluó atributos como sabor, acidez, cuerpo y posgusto en muestras de café tostado.

Este enfoque integral asegura que los efectos del secado en la calidad del café sean evaluados de manera objetiva y subjetiva.

7.2. Materia prima

Para esta investigación se utilizó café arábigo de la variedad castillo, recolectado manualmente en tres municipios del Valle del Cauca: Sevilla, La Cumbre y Dagua. Los granos de café fueron procesados y secados hasta llegar a pergamino. Las muestras de Sevilla se utilizaron en pruebas preliminares para familiarizarse con el equipo y los procedimientos experimentales. Las muestras de La Cumbre se destinaron a las pruebas de cinética de secado debido a su consistencia en tamaño y humedad inicial, mientras que las de Dagua fueron empleadas para el análisis sensorial, seleccionadas por su homogeneidad en atributos sensoriales, en la figura 3 se aprecia la distribución geográfica de las muestras de café del departamento.

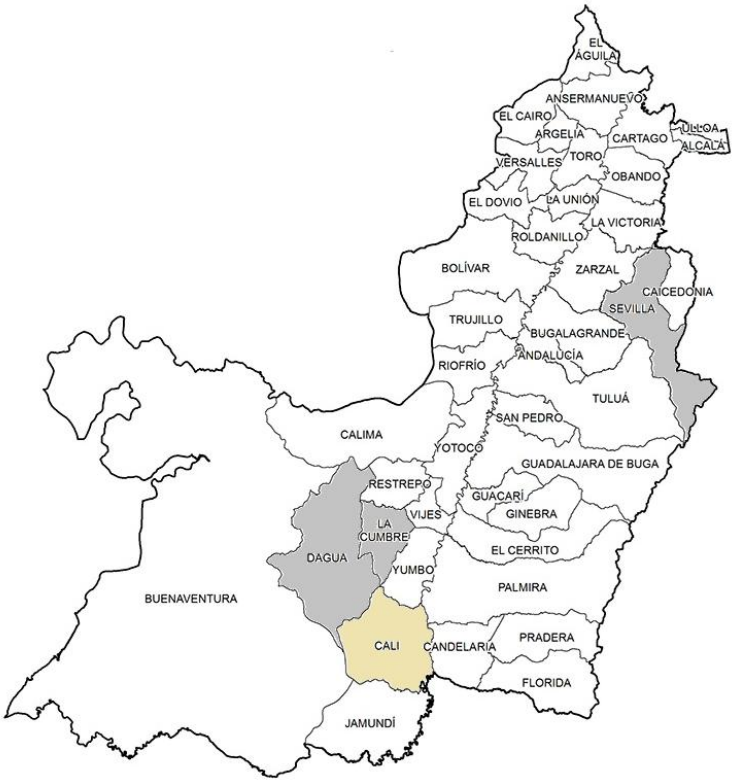


Figura 3 Distribución geográfica de las muestras de café en el Valle del Cauca

7.3. Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el Laboratorio de Fenómeno de Transporte de la Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle, ubicado en el edificio E32, en la ciudad de Cali, Colombia. La región donde se encuentra la Universidad está situada a una altitud aproximada de 1000 metros sobre el nivel del mar, con temperatura ambiente promedio de 29°C y una humedad relativa de alrededor del 70%.

7.4. Proceso experimental

7.4.1. Secado del café

El proceso de secado de los granos de café se realizó utilizando un secador asistido por bomba de calor modificado. Este secador permite el control preciso de la humedad relativa, uno de los factores más importantes para la estabilidad y calidad del grano de café de especialidad.

Las condiciones experimentales de secado fueron controladas bajo tres niveles de humedad relativa: 20%, 30% y 40%, con una velocidad de flujo de aire constante de 1,8 m/s. Para cada lote de prueba, se colocaron aproximadamente 500 gramos de granos de café húmedos en dos bandejas dentro de la cámara de secado. Las bandejas se posicionaron en dos niveles: una en

la parte superior y otra en la parte inferior de la cámara, con el fin de evaluar cualquier diferencia en la distribución del calor y el proceso de secado.

7.4.2. Secador modificado asistido por bomba de calor: características y funcionamiento

El secador utilizado en esta investigación fue un equipo modificado específicamente para el secado del café, con denominación DBC-UNV, BC-354, fabricado por Dartico, cuenta con una capacidad máxima de 5 kg de grano húmedo por lote. Este equipo cuenta con un sistema automatizado que permite controlar la humedad relativa, en el cual se evaluaron tres rangos: 20%, 30% y 40%. Además, mantiene una velocidad constante de flujo de aire de 1,8 m/s para asegurar una distribución uniforme del calor

El secador está compuesto por los siguientes elementos clave:
- Compresor: Ubicado dentro del circuito de flujo de aire, lo que genera un aporte adicional de calor a través de convección y radiación, incrementando la eficiencia del proceso.
- Evaporador y Condensador: El aire húmedo es primero deshumidificado al pasar por el evaporador, luego recalentado al pasar por el condensador, lo que asegura una transferencia de calor eficiente y controlada.
- Blower centrífugo: Este componente garantiza una circulación constante de aire dentro de la cámara de secado.
- Sistema de monitoreo: Sensores de humedad y temperatura fueron instalados en la cámara para registrar las condiciones ambientales en tiempo real, lo que permitió ajustar las condiciones de secado en función de los datos obtenidos.

7.4.3. Determinación de la cinética de secado

El contenido de humedad de los granos fue monitoreado a lo largo del proceso de secado. Inicialmente, el peso húmedo de los granos fue registrado y luego se procedió a realizar mediciones cada 10 minutos durante la primera hora, cada 30 minutos hasta las 12 horas de haber iniciado el secado, después cada 1 hora hasta llegar a las 20 horas de haber iniciado el secado, y cada 2 horas después de las 20 horas de haber iniciado el secado hasta que el contenido de humedad alcanzó el 10-12%. Las muestras fueron colocadas en una estufa a 105°C siguiendo la Norma Técnica Colombiana NTC 2325:2005 para determinar el peso seco y calcular la tasa de pérdida de humedad. Este método permitió trazar la curva de secado y analizar la cinética del proceso bajo las diferentes condiciones de humedad relativa. Para la representación de la cinética de secado, se utilizaron herramientas de programación en Python.

7.4.4. Medición y control de la humedad relativa, temperatura y humedad del aire en circulación durante el secado

La humedad relativa, la temperatura y la humedad del flujo de aire dentro de la cámara de secado fueron registradas de manera simultánea y similar a la utilizada para la cinética de secado en la que se tomaban datos, cada 10 minutos durante la primera hora, cada 30 minutos

hasta las 12 horas de haber iniciado el secado, después cada 1 hora hasta llegar a las 20 horas de haber iniciado el secado, y cada 2 horas después de las 20 horas de haber iniciado el secado hasta que el que el contenido de humedad alcanzó el 10-12%. Estos datos se utilizaron para ajustar las condiciones del secado y asegurar que se mantuvieran estables a lo largo del experimento.

7.4.5. Determinación del color

Para evaluar el impacto del secado en el color del grano de café, se utilizó el sistema CIELab, que es ampliamente reconocido para la evaluación del color en alimentos. Las mediciones se realizaron con el colorímetro Konica minolta, Chroma meter cr-400, el cual fue calibrado previamente con placas de color negro, blanco y verde. Las muestras de café secado fueron colocadas en cajas Petri y cubiertas con la placa negra para asegurar una lectura precisa.

Se midieron las coordenadas cromáticas: L* (luminosidad), a* (componente rojo-verde) y b* (componente azul-amarillo). Estas mediciones permitieron evaluar objetivamente los cambios en la apariencia visual del café seco en pergamino. Para la representación de la determinación de color, se utilizaron herramientas de programación en Python.

7.4.6. Evaluación de la calidad y categoría del café (propiedades organolépticas)

Las muestras de café secado fueron tostadas a un nivel medio y enviadas a un panel de catadores certificados por la SCA para su evaluación sensorial. Las sesiones de cata se llevaron a cabo en Tecnicafé, ubicado en el municipio de Cajibío, en el departamento de Cauca, bajo condiciones controladas, siguiendo los protocolos de evaluación establecidos por la SCA. Fue realizado por tres (3) catadores Q-grader, por ende, se realizó triplicado para cada condición (20, 30 y 40% HR) y método tradicional, estos evaluaron atributos clave del café, como acidez, cuerpo, sabor y posgusto, asignando puntuaciones a cada uno de ellos. El análisis sensorial permitió determinar el impacto del proceso de secado en la calidad percibida del café de especialidad, lo cual es crucial para comprender cómo las variaciones en las condiciones de secado afectan el perfil sensorial. Para la representación del análisis sensorial, se utilizaron herramientas de programación en Python.

7.4.7. Diseño experimental y análisis de datos

El diseño experimental consistió en un diseño de un solo factor con tres niveles de humedad relativa (20%, 30% y 40%), y las variables de respuesta incluyeron la cinética de secado, el color y el análisis sensorial del café.

Tabla 2 Diseño experimental

Factor	Niveles	Variables de respuesta
Humedad relativa	HR1, HR2, HR3	Cinética de secado (Chbh) Color Análisis sensorial (aroma, sabor, cuerpo, acidez, dulzura y balance)

La cinética de secado se realizó por duplicado. En el primer ensayo, se determinó el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad deseado, mientras que en el segundo se confirmó el resultado y se tomaron muestras para el análisis sensorial.

Para la evaluación sensorial, se llevó a cabo la catación según el protocolo establecido por la SCA, con la participación de tres (3) catadores certificados Q Grader Arábica. Cada catador realizó su evaluación de manera independiente, calificando aspectos como fragancia/aroma, acidez, cuerpo, balance y puntuación final. Posteriormente, se calculó un puntaje promedio a partir de sus evaluaciones. Dado que cada catador evaluó la muestra de forma separada, el análisis sensorial se considera un experimento triplicado

7.4.7.1. Análisis Estadístico del tiempo de secado

Para evaluar el efecto de la humedad relativa en el tiempo de secado, se utilizó un ANOVA de una vía, considerando la humedad relativa como el factor independiente y el tiempo total de secado (en horas) hasta alcanzar un contenido de humedad del 10-11,5% como la variable de respuesta. Se analizaron tres niveles de humedad relativa: 20%, 30%, 40% y el método tradicional. Para cada condición, se registraron tres valores de tiempo de secado, obtenidos de mediciones repetidas bajo las mismas condiciones experimentales.

Posteriormente, se aplicó la prueba de Tukey HSD (Honest Significant Difference) con un nivel de significancia de $p < 0,05$; para identificar qué grupos presentaban diferencias estadísticas significativas entre sí. Los análisis estadísticos se realizaron en Python, utilizando las librerías statsmodels y scipy

7.4.7.2. Análisis Estadístico del Puntaje SCA

Para evaluar el efecto del método de secado en la calidad sensorial del café, se realizó un ANOVA de una vía, considerando la humedad relativa como el factor independiente y el puntaje SCA final como la variable de respuesta. La evaluación sensorial fue realizada por tres catadores certificados Q Grader Arábica, quienes calificaron cada muestra de café siguiendo el protocolo de la SCA. Cada catador evaluó cinco tazas por muestra y otorgó un puntaje final

consolidado, basado en atributos como fragancia/aroma, acidez, cuerpo, balance y puntuación general. Para cada nivel de humedad relativa (20%, 30%, 40% y método tradicional), se registraron tres valores de puntaje SCA, correspondientes a las evaluaciones individuales de cada catador. Esto permitió considerar el análisis sensorial como un diseño experimental triplicado, asegurando mayor confiabilidad en los resultados.

Posteriormente, se aplicó la prueba de Tukey HSD ($p < 0,05$) para determinar cuáles tratamientos presentaban diferencias significativas en la calidad sensorial. El análisis se realizó en Python, utilizando la función ols() statsmodels para el ANOVA y la función pairwise_tukeyhsd() para la prueba de Tukey.

8. Resultados y discusión

8.1. Cinética de secado

El comportamiento de la cinética de secado de los granos de café se evaluó bajo tres diferentes condiciones de humedad relativa. En la figura 4, se presenta la relación entre el contenido de humedad del grano (%) y el tiempo (min) para cada una de las condiciones estudiadas.

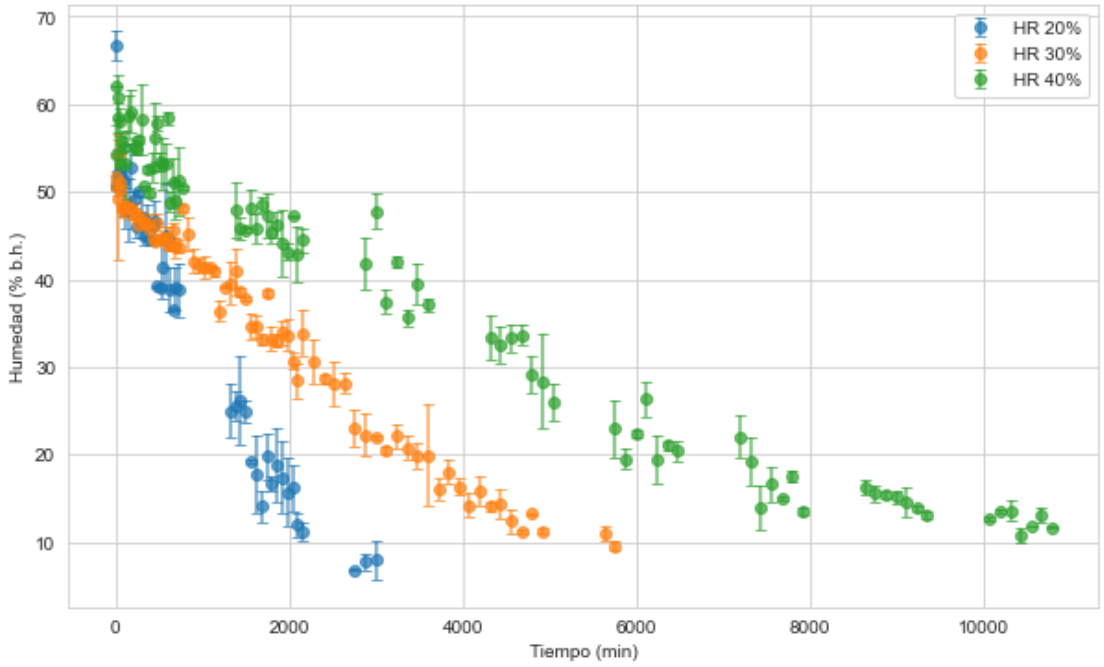


Figura 4 Humedad del grano en función del tiempo bajo diferentes humedades relativas

La Figura 4 muestra la evolución del contenido de humedad del grano de café durante el proceso de secado para cada una de las condiciones de humedad relativa a lo largo del tiempo. Se puede observar que a medida que transcurre el tiempo, el contenido de humedad de los granos disminuye, alcanzando niveles deseables en el secado de café pergamino, un intervalo entre 10 y 12% de contenido de humedad en base húmeda. El tiempo de secado total fue

alrededor de 2200, 5100 y 10800 minutos (37, 85 y 180 horas) para las condiciones de 20, 30 y 40%, respectivamente. En el proceso de secado la transferencia de calor y masa es una de las responsables de reducir el contenido de agua de los granos y en los procesos de secado, cuanto menor sea la energía de activación, mayor será la difusividad del agua en un producto. En otras palabras, cuanto menor sea la energía requerida para que se produzca una transformación física, en este caso la transformación de agua libre de líquido a vapor (secado) mayor será la difusividad de agua. En el mismo orden la entalpía se reduce al aumentar la temperatura y valores de entalpía más bajos indican que se requiere menos energía para eliminar el agua unida al grano durante el secado (Corrêa et al., 2010).

Coradi et al. (2007) en su estudio establecieron un tiempo de secado de 8 días para café lavado y de 13 días para café natural utilizando secado solar. Comparado con los resultados de esta investigación, los tiempos obtenidos con el uso del secador asistido por bomba de calor son notablemente más eficientes.

En cuanto al tiempo de secado, Parra-Coronado et al. (2008) en su estudio para que los sistemas de secado de café, o de cualquier grano, sean eficientes, menciona que se debe conocer la manera de operarlos adecuadamente. Haciendo uso de técnicas de simulación matemática del secado ejecutadas por computadores, los cuales analizan las predicciones del comportamiento de los granos durante el proceso de secado y efectúan las recomendaciones para el dimensionamiento y operación de los sistemas de secado. Encontró que a temperaturas del aire de secado de 40 y no de 50 °C, se obtiene una mayor uniformidad en el contenido de humedad final del grano (disminuye el coeficiente de variación), pero aumenta el tiempo de secado. El tiempo de secado (para los granos en las cámaras de secado y de presecado) para una temperatura de 40 °C se incrementa en 17 y 20 h respectivamente. En otros términos, si el tiempo de secado a 50 °C es de 23 y 32 h para el grano ubicado en las cámaras de secado y de presecado respectivamente estos se incrementarán a 40 y 52 h cuando se utilice una temperatura del aire de secado de 40 °C.

En los sistemas de secado mecánico de café se logra reducir el contenido de humedad del grano desde 52-56% bh, hasta el 10-12% bh, en un periodo de tiempo relativamente corto en comparación con el secado tradicional, dependiendo del tipo de secador y de las condiciones de operación del sistema, reduciendo así el riesgo de deterioro ocasionado por el ataque de hongos y de microorganismos (Parra-Coronado et al., 2008). Por eso mismo, Phitakwinai et al. (2019) encontraron en su investigación que, al evaluar los efectos de diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C) y niveles de humedad relativa del aire (10, 20 y 30%) en un sistema de secado mecánico, un aumento en la temperatura acompañado de una reducción en la humedad relativa resulta en una disminución significativa del tiempo de secado. En el secado convectivo, la elevación de la temperatura favorece la transferencia de calor hacia el grano, acelerando la evaporación del agua interna cuando la humedad relativa es baja. Este proceso de evaporación se mantiene hasta que la presión de vapor en la superficie del grano se equilibra con la del aire.

Dentro del proceso de producción, la etapa de secado juega un papel fundamental en la determinación de la calidad del café. Durante esta fase, pueden surgir diversos defectos que

afectan de manera significativa el producto final. Entre los defectos más comunes que inciden en la calidad de la bebida se encuentran los granos cristalizados, sobre-secados y flojos, los cuales perjudican la calidad del café (González-Salazar et al., 2010). En general, el café pergamino tarda en llegar a 10-12% de contenido de humedad en el secador tradicional solar es entre 7 a 15 días dependiendo de las condiciones climáticas (Puerta, 2013).

En la tabla 3, se presentan los resultados obtenidos para cada condición experimental y el rango estimado del tiempo total secado en el método tradicional:

Tabla 3 Datos utilizados para el análisis estadístico en el tiempo de secado

Humedad Relativa	Tiempo de Secado (h)
20%	35
	37
	38
30%	82
	85
	88
40%	174
	177
	180
Tradicional	240
	300
	360

En las tablas 4 y 5, respectivamente, se presenta los resultados del ANOVA y la prueba de Tukey para el tiempo de secado

Análisis estadístico para la cinética de secado

Tabla 4 ANOVA – Tiempo de secado

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	df	F	p-valor
Humedad Relativa	120,894	3	44.52	0.000025
Error (Residual)	7,240	8		

Como $p < 0.05$, existen diferencias significativas en el tiempo de secado entre los tratamientos, por consiguiente, la prueba de Tukey es la siguiente:

Tabla 5 Prueba de Tukey – Tiempo de secado

Comparación	Diferencia de Medias (h)	p-valor	Diferencia Significativa ($p < 0,05$)
20% vs 30%	48,33	0,2753	✗ No
20% vs 40%	140,33	0,002	☑ Sí
20% vs Tradicional	263,33	0,000	☑ Sí
30% vs 40%	92,00	0,0235	☑ Sí
30% vs Tradicional	215,00	0,0001	☑ Sí
40% vs Tradicional	123,00	0,0046	☑ Sí

De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA) indicó que la humedad relativa tuvo un efecto altamente significativo en la velocidad del secado ($p < 0,05$) (Tabla 4). La prueba de comparaciones múltiples de Tukey mostró que todos los tratamientos realizados con el equipo de secado asistido por bomba de calor (20%, 30% y 40%) fueron significativamente más rápidos que el método de secado tradicional ($p < 0,05$) (Tabla 5).

El equipo de secado no solo redujo drásticamente el tiempo de procesamiento, sino que también permitió una estandarización del proceso, asegurando condiciones controladas e independientes de factores climáticos externos. En comparación con el método tradicional que tarda varios días en procesarse, requiere grandes espacios de secado y es un proceso no controlado basado en la experiencia del agricultor (Largo-Avila et al., 2023), así mismo depende de la variabilidad ambiental y puede tomar entre 240 y 360 horas en completar el secado, el equipo logró reducir el tiempo hasta en un 86%, alcanzando niveles óptimos de humedad en menos de 40 horas en el mejor tratamiento.

Colombia es uno de los principales países exportadores de café a nivel mundial. En 2023, las exportaciones alcanzaron los 10,6 millones de sacos de 60 kg (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2024) La tecnificación en la producción cafetera juega un papel fundamental en el aumento de la productividad sin comprometer la calidad del café, un factor clave para su comercialización (Bravo et al., 2022).

La tecnología actualmente disponible para el secado del café solo aumenta las tasas de secado al aumentar la temperatura o el flujo de aire. Sin embargo, temperaturas superiores a 40°C causan daño térmico que degradan la calidad del café (Alves et al., 2020). Sin embargo, Borém et al. (2018) sugirieron que una estrategia efectiva para reducir el tiempo de secado sin recurrir a temperaturas superiores a 40°C es disminuir la humedad relativa del aire, lo que permite evitar el daño térmico asociado con temperaturas elevadas. De manera similar, López Fontal (2006) estudió el secado de café en lecho fluidizado con aire caliente a 42, 46 y 49 °C, y niveles de humedad relativa del aire de 26, 21 y 19%, concluyendo que tanto la temperatura como la humedad relativa del aire son factores críticos en las tasas de secado y en el tiempo total requerido para secar el café. Además, las evaluaciones sensoriales de los tratamientos indicaron mejoras en las características organolépticas del café secado bajo estas condiciones; el control preciso de la humedad y temperatura dentro del equipo garantiza una cinética de secado uniforme, eliminando variaciones en la calidad del grano y evitando defectos asociados a

secados irregulares o excesivamente prolongados. Esto se traduce en una mayor eficiencia operativa, optimización del flujo de trabajo y una capacidad de procesamiento más predecible para los productores. De igual modo, Colak & Hepbasli (2009) nos menciona que los secados asistidos con bomba de calor ofrecen varias ventajas sobre los secadores de aire caliente convencionales para el secado de productos alimenticios, incluida una mayor eficiencia energética, una mejor calidad del producto y la capacidad de operar independientemente de las condiciones climáticas exteriores. Además, esta tecnología es respetuosa con el medio ambiente debido a su bajo requerimiento de energía y a la no liberación de gases y humos a la atmósfera, también las cualidades de color y aroma de los productos agrícolas secos que usan secado asistido por bomba de calor fueron mejores que los productos que usan secadores de aire caliente convencionales.

8.2. Temperatura y humedad relativa, y su efecto en el secado

La Figura 5 muestra la evolución de la temperatura del aire durante el proceso de secado para cada condición experimental. Es evidente que la temperatura se mantuvo dentro del rango establecido para cada configuración, con ligeras variaciones debido a la dinámica del sistema de bomba de calor.

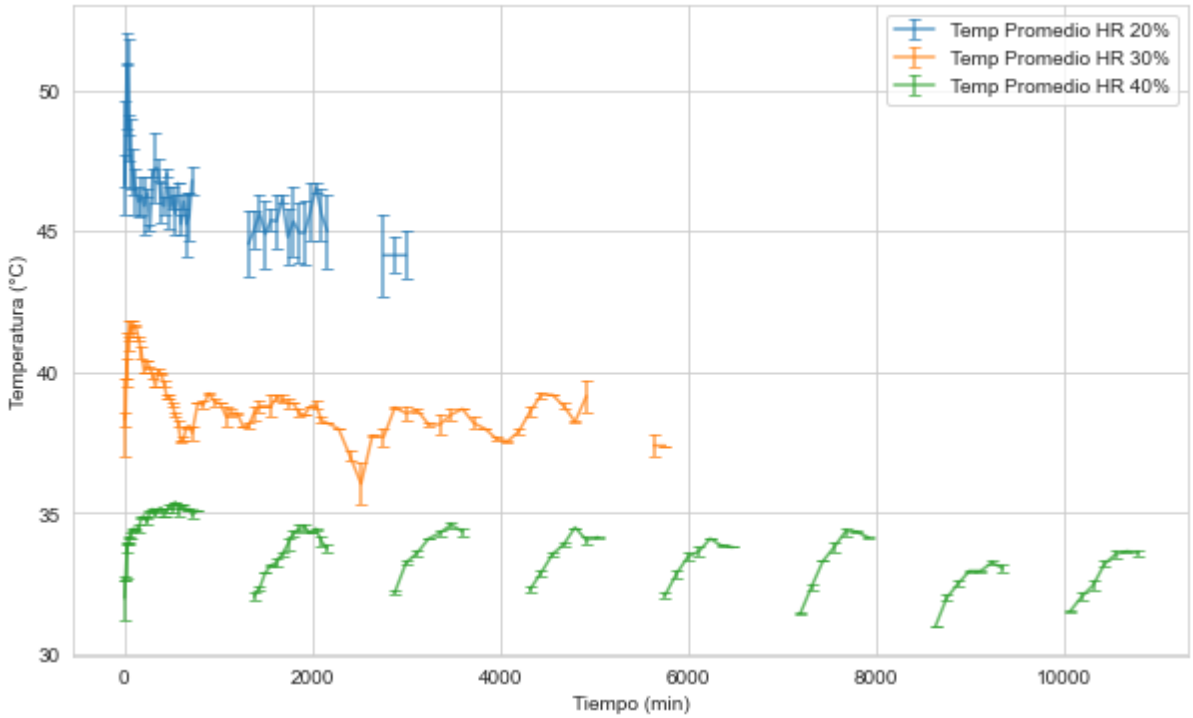


Figura 5 Temperatura del aire en función del tiempo bajo diferentes humedades relativas

Se puede observar en la Figura 5 que las temperaturas promedio registradas fueron de 46,10 ± 1,89°C, 38,81 ± 1,32°C y 33,82 ± 1,08°C para condiciones de (HR) del 20, 30 y 40%, respectivamente. Al analizar conjuntamente esta figura 5 con la figura 4, se evidencia que, a mayor temperatura y menor humedad relativa, se alcanza de una manera más rápida la humedad

deseada y el proceso de secado se acelera, esto sucede debido a que un incremento en la temperatura genera una mayor diferencia de presión de vapor parcial, entre el aire seco y el producto, lo que facilita la eliminación del agua de manera más rápida y eficiente, traduciéndose en un secado más veloz (Siqueira et al., 2017). De igual modo la reducción del tiempo de secado debido al aumento de temperatura se le atribuye a que el aumento de las temperaturas reducen la viscosidad del agua e influyen directamente en la resistencia del fluido al flujo, mientras que una viscosidad disminuida facilita la difusión de las moléculas de agua a través de los capilares del grano, y además incrementa los niveles de vibración de las moléculas de agua, lo que contribuye a aumentar las velocidades de secado (Alves et al., 2020).

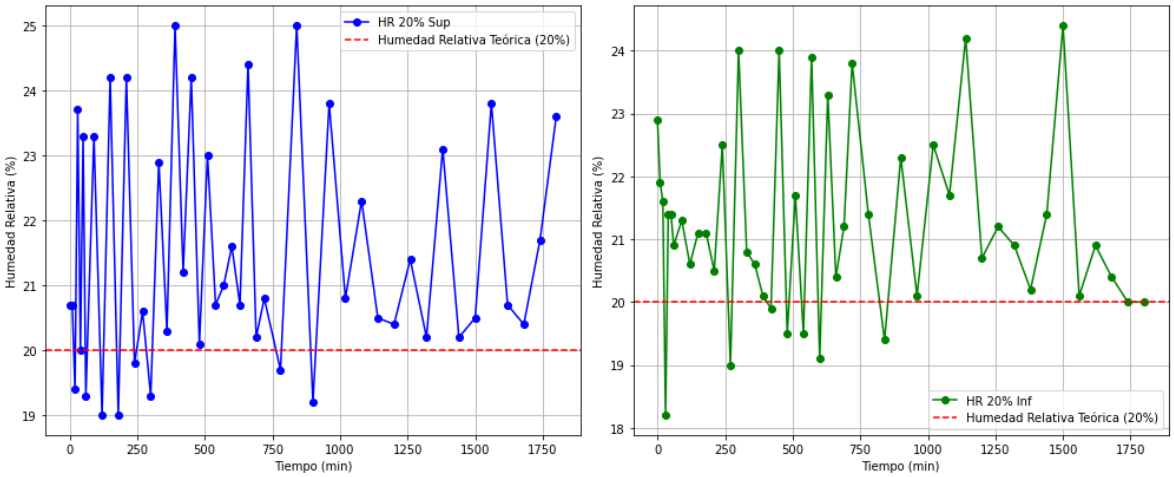
Es fundamental tener en cuenta que, aunque temperaturas más altas pueden acelerar los métodos de secado con aire convectivo, existe un riesgo considerable de daño térmico en los granos de café si no se toman las precauciones necesarias, lo que puede impactar negativamente la calidad del producto. Casé (2022) en su investigación sobre procesos alternativos de secado para café arábica, concluyó que en secadores mecánicos (sean horizontales, verticales o mixtos) no se deben exceder temperaturas de 40-45°C para evitar daños térmicos en la estructura del grano. Este hallazgo es coherente con lo establecido por Arcila-Pulgarin (1976), quien determinó que las semillas de café pueden secarse artificialmente a temperaturas de hasta 45°C y a un porcentaje de contenido de humedad (%CHbh) de 12-13% sin comprometer su viabilidad. Así mismo, Rivillas & Gaitan (2013) recomiendan que, en secadores mecánicos con flujo de aire, la temperatura no supere los 37°C para garantizar que el embrión, la parte más superficial del grano que contiene componentes esenciales como cafeína, proteínas, aceites, azúcares y ácidos clorogénicos, no sufra daños. Este enfoque es respaldado por la investigación de Borém et al. (2018), quienes estudiaron la calidad del secado de café natural bajo diferentes temperaturas y tasas de secado, concluyendo que la calidad del café depende de la preservación de las membranas celulares en los granos de café, las cuales pueden dañarse durante el secado. Su estudio, que analizó el impacto de temperaturas de 35, 40 y 45°C en secadores mecánicos, encontró que temperaturas superiores a 40°C causan daños significativos, mientras que temperaturas de 35°C son recomendables para cafés de especialidad.

Siqueira et al. (2017) en su estudio sobre cinética de secado del café natural procesado con alto contenido de humedad, encontraron que la mayor tasa de reducción de agua se observó a la temperatura de secado de 40 ±1°C debido a la mayor diferencia entre la presión parcial de vapor de agua del aire de secado y el producto, lo que provocó que el agua se eliminara más fácil y rápidamente, lo que se traduce en un menor tiempo de secado en comparación con 35 ±1 °C. El procesamiento del café requirió 47,5; 57,25; 67,25; y 76,5 horas a 40 ±1°C y 58, 67, 72,5 y 81 horas a 35 ± 1°C para los cafés procesados con 0,56; 0,41; 0,28 y 0,20 ± 0,02 (bs) respectivamente. Estos resultados indican una aceleración del proceso de secado haciendo uso de temperatura de 40°C siendo consistentes con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

Adicionalmente, es válido mencionar que Henao (2016) sugiere que también se podrían secar los granos de café de una manera más rápida, utilizando una temperatura de secado de 50ºC cuando el café aún tiene un contenido de humedad superior al 40% para evitar sobre

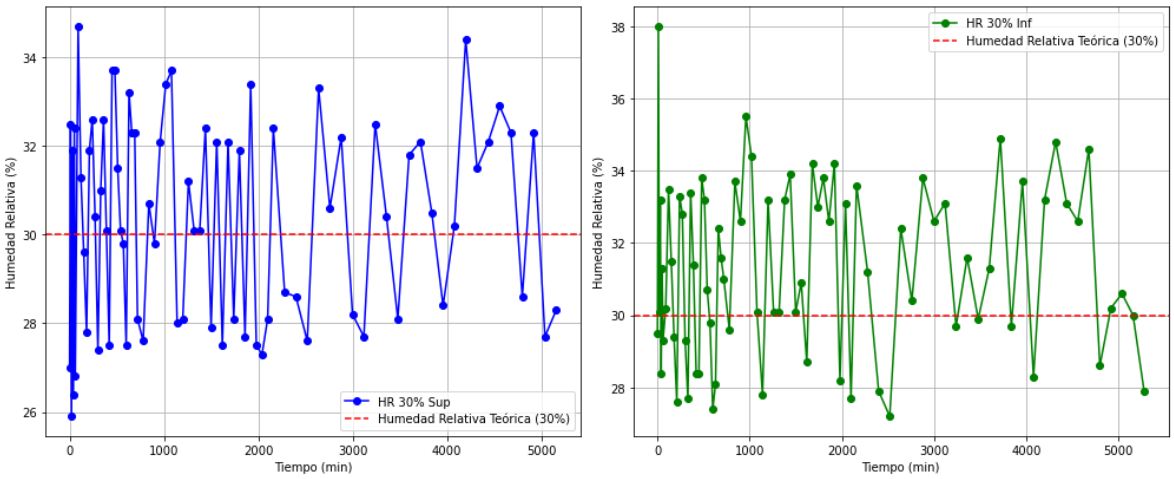
fermentaciones que pueden ocurrir al inicio del proceso y así el hongo *Aspergillus ochraceus* que puede producir en el café húmedo la ocratoxina A (OTA), sustancia química tóxica y cancerígena, no pueda afectar la calidad del café (Puerta-Quintero, 2008). Además, Henrique et al. (2016), recomiendan el uso de temperaturas elevadas (60ºC) al comienzo del secado, cuando el grano tiene una humedad superior al 30%, seguido de una reducción en la temperatura del aire a 40ºC, lo que resulta en una remoción menos intensa de la humedad y favorece la calidad en taza. Como se puede observar en la figura 5, las temperaturas iniciales eran mayores, concordando con lo mencionado anteriormente

Por último, se analiza la diferencia entre la humedad relativa teórica y la humedad relativa real medida durante los experimentos en las figuras 5, 6 y 7 para la bandeja superior e inferior en las condiciones de 20, 30 y 40% de HR, respectivamente. Se observa que, aunque el equipo se ajustó a una condición específica, existieron fluctuaciones en los valores reales de humedad relativa. Estas variaciones se deben a factores inherentes al equipo y al sistema de control.



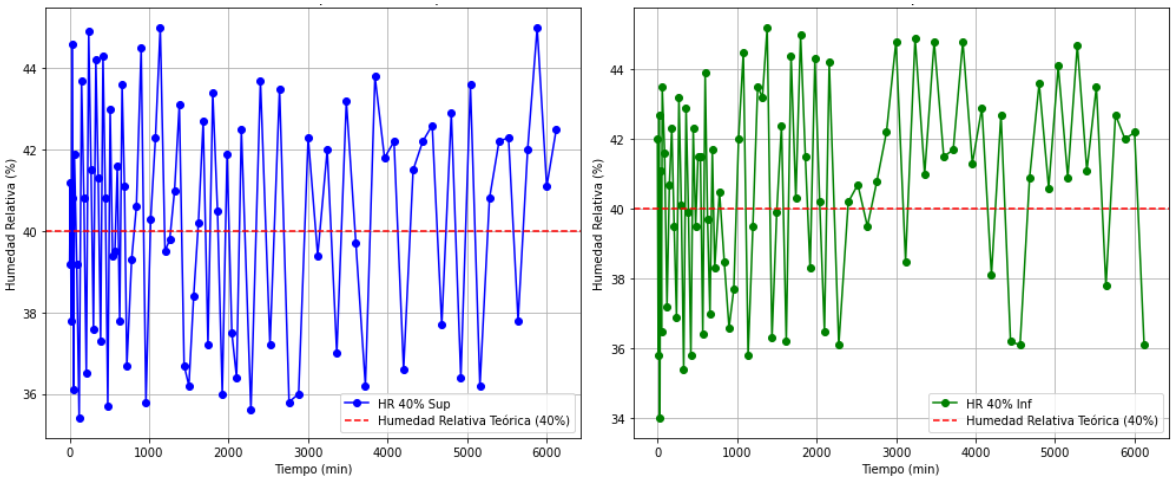
(a) **(b)**

Figura 6. Humedad relativa teórica de 20% y la humedad relativa real en función del tiempo para la bandeja superior (a) e inferior (b)



(a) **(b)**

Figura 7 Humedad relativa teórica de 30% y la humedad relativa real en función del tiempo para la bandeja superior (a) e inferior (b)



(a) **(b)**

Figura 8 Humedad relativa teórica de 40% y la humedad relativa real en función del tiempo para la bandeja superior e inferior

8.3. Velocidad del aire

A continuación, en las figuras 9, 10 y 11 se presenta el comportamiento de la humedad del aire a lo largo del proceso de secado para las condiciones de 20, 30 y 40% de HR, respectivamente. Se muestran las humedades relativas antes y después del ciclo de refrigeración, donde se aprecia la absorción de humedad del aire al pasar por los granos de café.

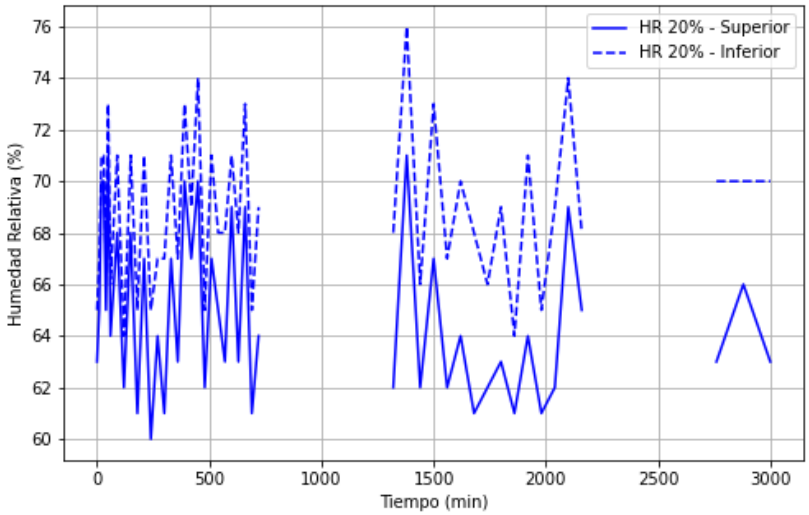


Figura 9. Humedad del aire circulante durante el ciclo refrigerante en función del tiempo en la condición de 20% HR

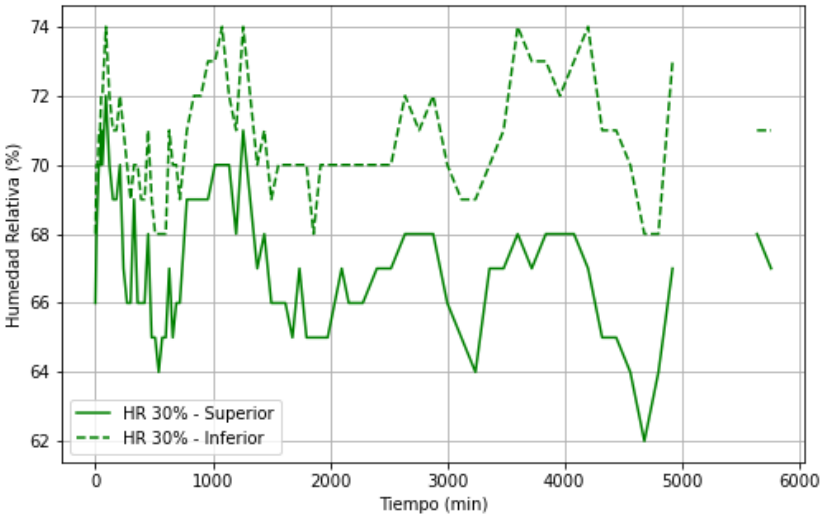


Figura 10. Humedad del aire circulante durante el ciclo refrigerante en función del tiempo en la condición de 30% HR

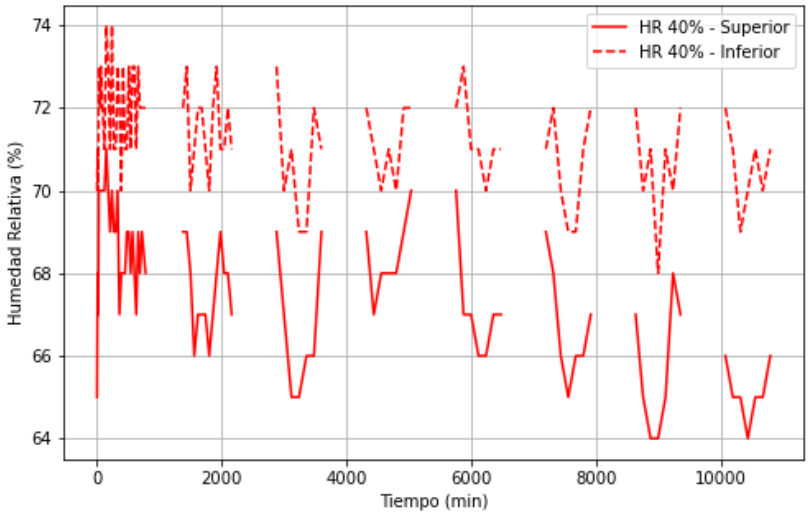


Figura 11. Humedad del aire circulante durante el ciclo refrigerante en función del tiempo en la condición de 40% HR

La velocidad del aire es otro factor crucial en el secado mecánico de granos de café. Durante la fase experimental, se utilizó la máxima capacidad de flujo de aire disponible de 1,8 m/s, y, por consiguiente, un caudal de aire de 32,4 m^3/min. En la investigación de Alves et al. (2020) se analizó el efecto combinado de la temperatura y la velocidad del aire, concluyendo que un incremento en ambos factores resulta en una mayor eficiencia en la reducción del contenido de humedad durante el secado, lo cual es consistente con nuestras observaciones.

Parra-Coronado et al. (2008) a través de simulaciones matemáticas, también determinaron que al aumentar el caudal de aire y reducir el espesor de la capa de granos, los tiempos de secado se hacen menores. De igual manera Henao (2016) destaca la importancia de controlar el caudal de aire de secado entregado por el ventilador, pues un flujo de aire deficiente en el sistema de secado provoca una variabilidad en el contenido de humedad final de los granos, trayendo

consigo granos flojos con humedad superior al 14% o granos sobre secos con humedad menor al 10%. Así mismo Parra-Coronado et al. (2008) menciona que, un adecuado caudal de aire que circule por la masa de café en proceso de secado, es muy importante para disminuir la variabilidad en la humedad final de los granos. Si el aire es insuficiente, se incrementa el tiempo de secado y los granos presentan alta disparidad en el contenido final de humedad. De otro lado, si el caudal es muy superior al necesario se estará consumiendo más energía para accionar los ventiladores y se tendrán mayores consumos de energía térmica para el calentamiento del aire, lo que incidirá negativamente en el costo del secado.

Alves et al. (2020), en su estudio sobre la evaluación de la cinética de secado de café natural y despulpado a diferentes temperaturas y flujos de aire, concluyeron que las condiciones óptimas para el secado se lograron a temperaturas de 40 y 45°C, con flujos de aire entre 24 y 132 $m^3/(min \cdot m^2)$. Además, señalaron que los tiempos de secado más cortos se alcanzaron a 45°C y con caudales de aire entre 96 y 132 $m^3/(min \cdot m^2)$. Lo que es consistente con los resultados obtenidos en este trabajo. Además, los autores sugieren que, para acelerar el proceso de secado sin superar las temperaturas máximas permitidas para el café, se puede utilizar un flujo de aire superior al que se emplea comercialmente

8.4. El secado y su influencia en el color y calidad

Color

En las figuras 12, 13 y 14 se evidencia la distribución de color en el café pergamino en las coordenadas L*, a* y b*, respectivamente para las muestras del secador asistido con bomba de calor para las condiciones de 20, 30 y 40% HR, y la muestra de secado tradicional.

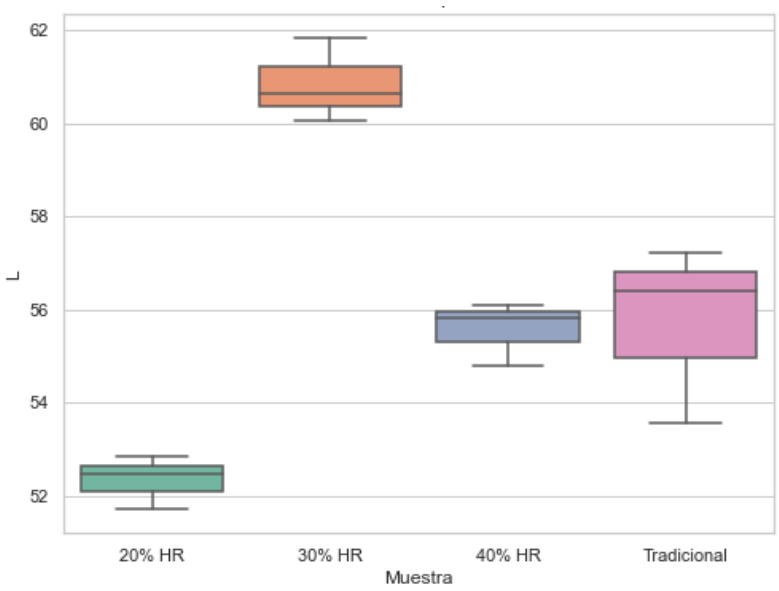


Figura 12 Distribución de L* en las muestras de café pergamino

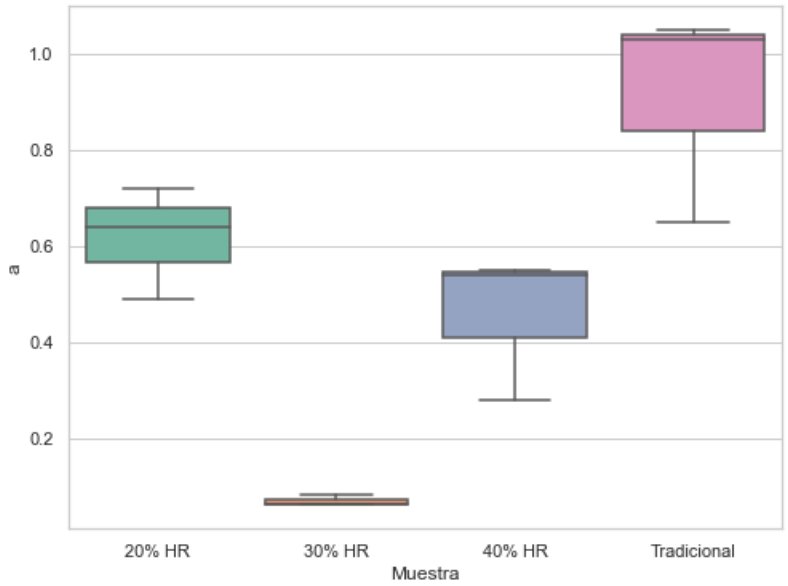


Figura 13 Distribución de a* en las muestras de café pergamino

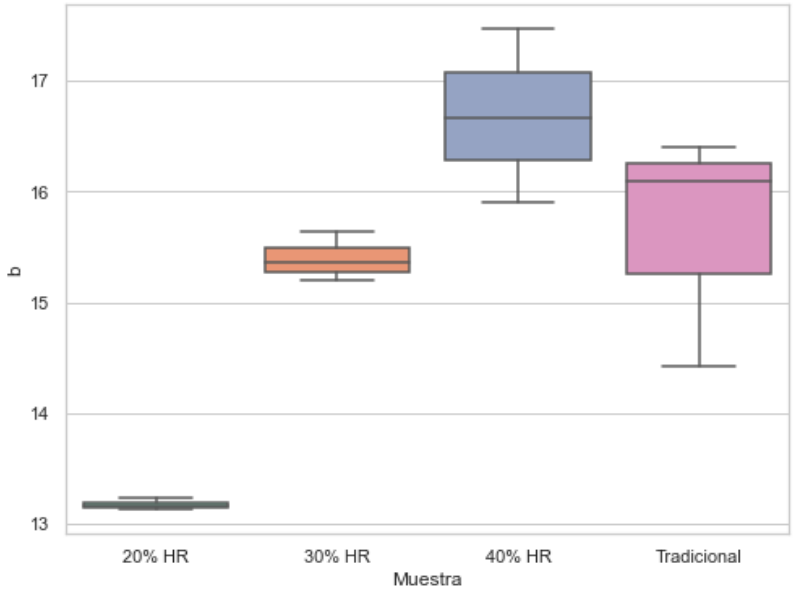


Figura 14 Distribución de b* en las muestras de café pergamino

Como se observa en las figuras 12, 13 y 14, la distribución del color en el café pergamino, representada por las coordenadas L*, a* y b*, muestra que la mayor variación se presentó en la muestra sometida al secado tradicional. En contraste, el café procesado con el secador asistido por bomba de calor modificada mostró una distribución de color más uniforme.

El proceso de secado tiene un impacto significativo en la coloración de los granos de café, un atributo clave de calidad. En el método tradicional, el color de los granos presentó mayor variabilidad en comparación con el secado asistido, lo que puede atribuirse a la exposición prolongada a la radiación solar y a fluctuaciones en la temperatura y la humedad. Estas

condiciones favorecen la degradación de los pigmentos naturales del café, generando tonalidades más amarillentas o blanquecinas (Oliveros et al., 2016).

Por otro lado, el secado mecánico con temperaturas controladas y constantes produjo un cambio de color menos pronunciado, ayudando a preservar la tonalidad verde-azulada característica del café de alta calidad. Investigaciones previas como Oliveros et al. (2016) coinciden en que temperaturas superiores a 40 °C durante el secado mecánico pueden acelerar procesos oxidativos y favorecer la aparición de granos blanqueados debido a la degradación de compuestos responsables del color. Esta investigación, al igual que la presente, determino que el secado solar genera una mayor variabilidad en el color debido a la exposición a la radiación solar, mientras que el secado mecánico, al realizarse en un ambiente confinado sin luz directa, mantiene una coloración más estable. Asimismo, en la misma investigación, al evaluar el efecto del almacenamiento, se encontró que el secado mecánico a 40 °C conservó mejor la coloración de los granos a lo largo del tiempo en comparación con el secado solar y el secado mecánico a 50 °C. En general, mientras que el secado solar tiende a generar mayor variabilidad en la apariencia del grano, el secado mecánico con temperaturas menores a 50°C ofrece una mayor estabilidad en el color, reduciendo defectos visuales y mejorando la uniformidad del producto final.

Análisis sensorial

En la figura 15, se muestra la comparación del puntaje final SCA para las muestras del secador asistido con bomba de calor para las condiciones de 20, 30 y 40% HR, y la muestra de secado tradicional

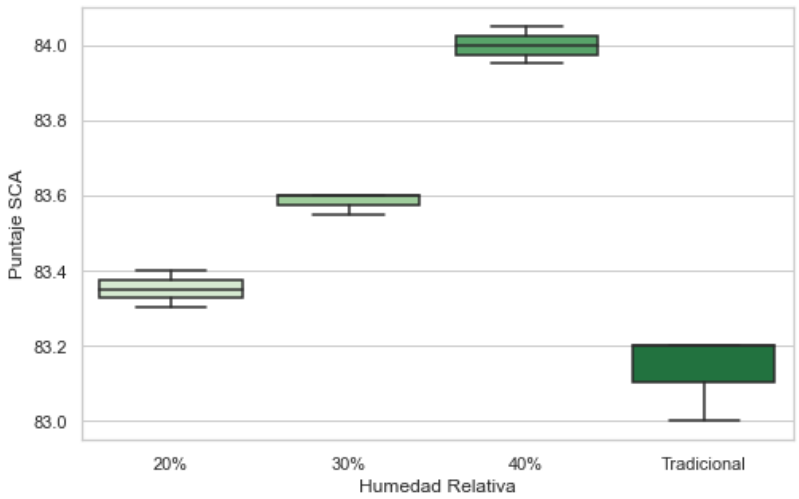


Figura 15 Puntaje final SCA para las muestras de café

En las figuras 16, 17, 18, 19 y 20 se aprecian las distribuciones de las principales características que se realiza en el análisis sensorial por los catadores Q Grader Arabica

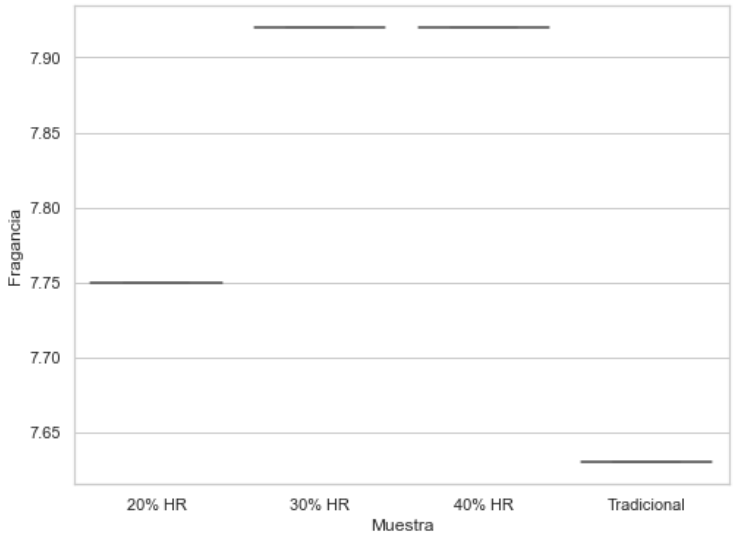


Figura 16 Distribución de fragancia para las muestras de café

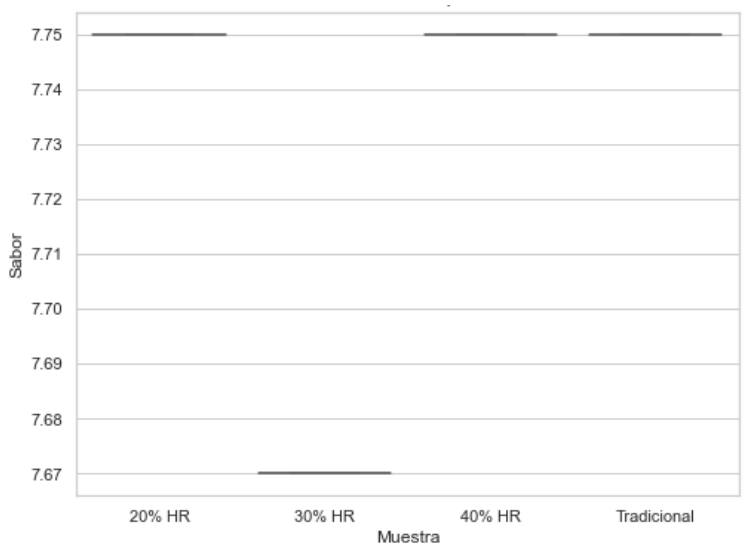


Figura 17 Distribución de sabor para las muestras de café

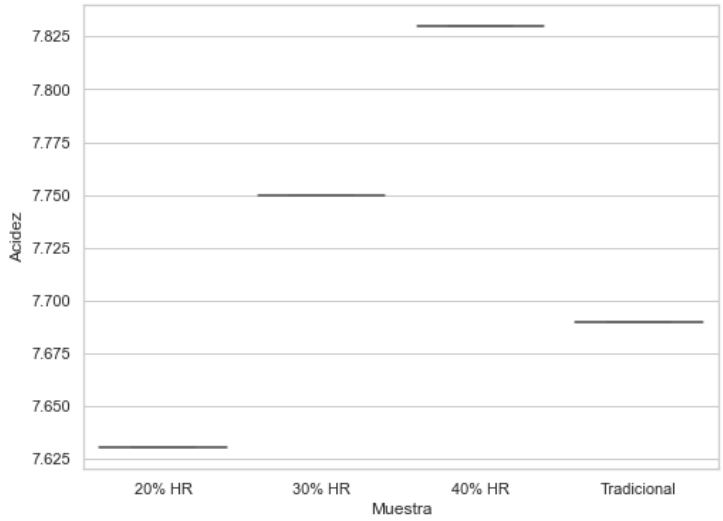


Figura 18 Distribución de acidez para las muestras de café

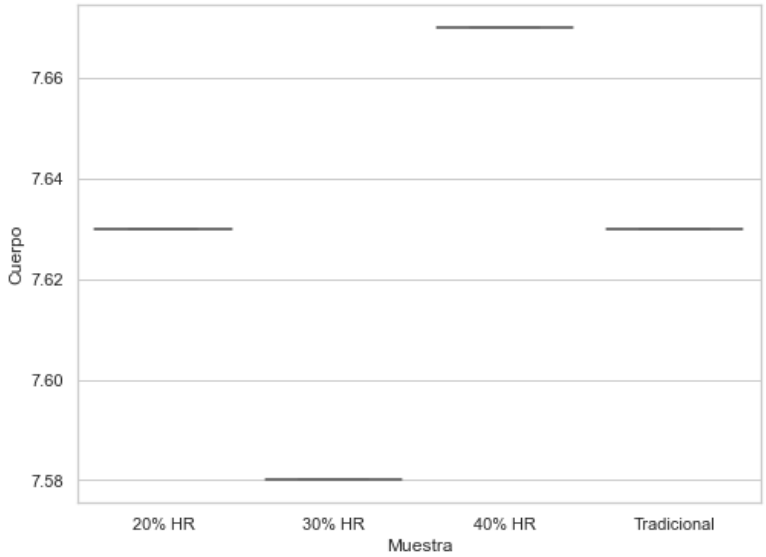


Figura 19 Distribución de cuerpo para las muestras de café

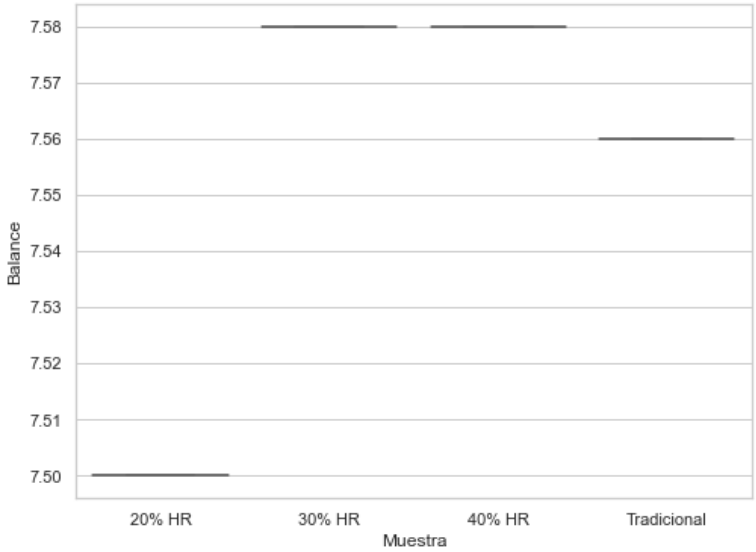


Figura 20 Distribución de balance para las muestras de café

En la tabla 6 se aprecia los perfiles sensoriales, definido por los catadores Q Grader Arabica

Tabla 6 Perfil sensorial de los diferentes métodos de secado. Fuente: elaboración propia

Método de secado	Perfil sensorial
Tradicional	Fragancia: chocolate, miel, floral Sabor: chocolate, cítrico, panela Sabor residual: prolongado chocolate amargo Acidez: media cítrica jugosa Cuerpo: medio
40% HR	Fragancia: chocolate, panela, caramelo Sabor: dulce cítrico, afrutado, panela Sabor residual: prolongada panela limón Acidez: media alta cítrica jugosa Cuerpo: medio
30% HR	Fragancia: panela, cacao, canela Sabor: cítrico, caña de azúcar, panela Sabor residual: corto dulce Acidez: media cítrica Cuerpo: medio ligero
20% HR	Fragancia: chocolate, caramelo, cítrico Sabor: naranja, nota melosa, panela Sabor residual: prolongado dulce Acidez: media Cuerpo: medio

Para el análisis estadístico se utilizaron los siguientes datos:

Tabla 7 Datos utilizados para el análisis estadístico en el análisis sensorial

Humedad Relativa	Puntaje SCA
20%	83,30
	83,40
	83,35
30%	83,55
	83,60
	83,60
40%	83,95
	84,00
	84,05
Tradicional	83,00
	83,20
	83,20

En las siguientes tablas 8 y 9, se presenta los resultados del ANOVA y la prueba de Tukey para el análisis sensorial

Tabla 8 ANOVA - Puntaje SCA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	df	F	p-valor
Humedad Relativa	12,383	3	86,14	**0,000002**
Error (Residual)	0,0383	8		

Como **p < 0,05**, hay diferencias significativas en el puntaje SCA entre los tratamientos, por consiguiente, la prueba de Tukey es la siguiente:

Tabla 9 Prueba de Tukey - Puntaje SCA

Comparación	Diferencia de Medias	p-valor	Diferencia Significativa (p < 0,05)
20% vs 30%	0,2333	0,014	☑ Sí
20% vs 40%	0,65	0,000	☑ Sí
20% vs Tradicional	-0,2167	0,0209	☑ Sí
30% vs 40%	0,4167	0,0004	☑ Sí
30% vs Tradicional	-0,45	0,0002	☑ Sí
40% vs Tradicional	-0,8667	0,000	☑ Sí

El análisis estadístico mostró que la humedad relativa durante el secado influyó significativamente en la calidad sensorial del café ($p < 0,05$) (Tabla 8). La prueba de Tukey confirmó que el café secado con el equipo a una humedad relativa del 40% obtuvo puntuaciones significativamente más altas en comparación con el secado tradicional y el secado con 20% de (HR) ($p < 0,05$) (Tabla 9).

La capacidad del equipo de mantener condiciones controladas y reproducibles tuvo un impacto directo en la calidad sensorial final del café. Los tratamientos con 40% de humedad relativa preservaron de manera óptima los atributos de fragancia/aroma, acidez, cuerpo y balance, alcanzando puntuaciones superiores a las del método tradicional por más de 0,86 puntos en promedio.

Por el contrario, el secado tradicional mostró la mayor variabilidad en la calidad del grano, la calidad química, física y organoléptica del café puede ser alterada al realizar un inadecuado proceso del secado solar lo que refleja la falta de control sobre las condiciones del proceso. Factores como cambios en la temperatura, humedad y exposición a contaminantes ambientales pueden afectar negativamente la composición química de las almendras de café y por lo tanto el perfil sensorial, disminuyendo el valor comercial del café (Largo, 2020) Teniendo en cuenta las figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 20, y la tabla 6, los resultados obtenidos en el análisis sensorial indican que los métodos de secado controlados por humedad relativa (HR) ofrecen perfiles de taza más balanceados y atractivos en comparación con el método tradicional.

Según lo mostrado en la figura 15, el puntaje total SCA obtenido bajo todas las condiciones del secador asistido por bomba de calor modificado fue superior al alcanzado mediante el secado tradicional. Es importante destacar que, aunque la menor humedad relativa (20% HR) en el equipo requirió aproximadamente 37 horas de secado, este tiempo fue considerablemente menor en comparación con los 12,5 días necesarios para el secado tradicional. Adicionalmente, esta reducción en el tiempo de secado también estuvo acompañada de una diferencia significativa superior en la calidad sensorial. Por otro lado, al comparar la condición de 40% HR con el secado tradicional, se observó una diferencia de casi un punto en la escala SCA, resultado muy relevante ya que en el ámbito del café de especialidad un incremento de un punto en esta escala representa una mejora significativa en la calidad. De manera similar, Alves et al. (2017) en su investigación sobre las calidades físicas y sensoriales del café arábica sometido a diferentes temperaturas y flujos de secado, determinaron que temperaturas entre 40 y 45°C disminuyen tanto la calidad física como la sensorial del café. Este estudio incluyó análisis sensoriales por catadores certificados de la SCA y pruebas físicas como la conductividad eléctrica y la lixiviación de potasio. Por otro lado, Andrade et al. (2024) analizaron los efectos de un proceso de secado utilizando un equipo innovador conocido como secador roto-aerado (roto-aerated dryer). Este estudio responde a un desafío similar al que enfrentamos en Colombia, particularmente entre los caficultores dedicados al café de especialidad, donde los métodos tradicionales suelen implicar largos tiempos de secado y deterioros indeseados en la calidad. En su investigación, lograron reducir el tiempo de secado en un 74% y, aunque emplearon temperaturas altas de manera controlada, consiguieron preservar de manera adecuada parámetros clave de calidad como el pH, la acidez y el contenido de azúcar.

Como se mencionó previamente, temperaturas más altas durante el secado mecánico pueden reducir la calidad del sabor. Sin embargo, los resultados demuestran que este método sigue siendo superior al secado tradicional. Esto se debe a que, como se explicó anteriormente, el secado con este equipo está influenciado principalmente por la humedad relativa, que permanece constante e independiente de factores externos como el clima u otros agentes. En consecuencia, es posible reproducir estos puntajes de manera consistente, mientras que el secado tradicional tiende a ser más variable debido a la falta de estandarización adecuada en su proceso.

8.5. Implicaciones de los resultados en la industria

El equipo implementado tiene el potencial de impactar significativamente no solo en el Valle del Cauca, sino también en todo el país, al abordar una de las etapas más variables y críticas en la producción de café: el proceso de secado. La caficultura ha sido un pilar fundamental en el desarrollo geopolítico, demográfico, político, económico, social y cultural de Colombia, contribuyendo al bienestar de más de 560000 familias distribuidas en 22 departamentos y 590 municipios (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2014). En el Valle del Cauca, donde 39 de los 42 municipios cultivan café, existen aproximadamente 22792 caficultores que dependen de esta actividad (Perafán & Restrepo, 2023), y la implementación de tecnologías avanzadas como el equipo propuesto podría mejorar notablemente la calidad de vida de estos productores al optimizar su producción y aumentar su competitividad en el mercado.

El secado del café es uno de los procesos más sensibles y determinantes en la producción de café de especialidad, ya que su variabilidad puede afectar gravemente la consistencia y calidad del producto final. El equipo investigado ofrece un control preciso de la humedad relativa durante el secado, lo cual es fundamental para los productores que buscan estandarizar sus prácticas y asegurar un producto homogéneo de alta calidad, características demandadas especialmente en el sector del café de especialidad. Este mercado en crecimiento, tanto a nivel nacional como internacional, está enfocado en satisfacer a un consumidor exigente que valora tanto los atributos sensoriales del café (aroma, sabor y cuerpo) como los aspectos éticos y sostenibles de su producción (Carvalho et al., 2016; Ospina, 2017)

Colombia se ha posicionado como uno de los mayores exportadores de café arábigo suave lavado, con una producción estimada en 2023 de 12 millones de sacos de 60 kg de café verde (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023). Este liderazgo en el mercado global de café de alta calidad presenta una oportunidad para que los caficultores adopten nuevas tecnologías, como el equipo de secado aquí propuesto, que optimizan los procesos de producción. La estandarización del secado no solo mejora la calidad y consistencia del café, sino que también permite a los productores competir de manera más eficiente en el segmento premium del mercado, donde los consumidores valoran profundamente los atributos sensoriales y funcionales del café, además de su trazabilidad y las certificaciones asociadas.

La sostenibilidad de la caficultura está cada vez más vinculada a la adopción de tecnologías que no solo mejoren la calidad del producto, sino que también promuevan un uso eficiente de

los recursos, minimicen los impactos ambientales y aseguren una mayor equidad en la distribución de los beneficios económicos. El equipo investigado contribuye a este objetivo al permitir un proceso de secado más controlado y eficiente, reduciendo los riesgos de daño térmico y ayudando a los productores a mantener la calidad sensorial y física del café, lo que es esencial para obtener certificaciones como las de comercio justo y orgánico. Estas certificaciones, a su vez, abren la puerta a nuevos mercados y precios más competitivos, beneficiando a los caficultores tanto económica como socialmente (Perafán & Restrepo, 2023).

9. Conclusiones

El secador asistido por bomba de calor modificado demostró ser una solución innovadora y eficiente para el secado del café de especialidad, ofreciendo un control más preciso del proceso a través de la regulación de la humedad relativa. Este enfoque permitió evitar los daños térmicos asociados con temperaturas elevadas, preservando las características organolépticas y físicas del café. Los análisis sensoriales posicionaron el secado al 40% HR como el método más destacado, al proporcionar un balance óptimo entre acidez, dulzura, cuerpo y fragancia, siguiendo por las condiciones de 30 y 20% HR. Y en cuanto al tiempo de secado, las condiciones de 20 y 30% fueron las más cortas. En comparación con el método tradicional, el secador propuesto mejoró tanto la calidad sensorial como la eficiencia del tiempo de secado, haciendo viable su implementación para productores que buscan estandarizar procesos y alcanzar estándares de calidad exigentes. Además, la alineación con normativas internacionales refuerza su aplicabilidad y potencial en la industria cafetera. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a la optimización del secado en el café de especialidad.

10. Bibliografía

Aiello-Mazzarri, C., Salazar, Y., Urribarrí, A., Arenas-Dávila, E., Sánchez-Fuentes, J., & Ysambertt, F. (2019). Producción de biodiésel a partir de las grasas extraídas de la borra de café: esterifcación con H2SO4 y transesterifcación con KOH. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *29*(1), 53–66. https://doi.org/10.18359/RCIN.2899

Alves, G. E., Borém, F. M., Andrade, E. T., Isquierdo, É. P., Siqueira, V. C., & Dias, C. A. (2020). INFLUENCE OF DIFFERENT TEMPERATURES AND AIRFLOWS ON DRYING OF NATURAL AND PULPED COFFEE. *Engenharia Agrícola*, *40*(2), 192–200. https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P192-200/2020

Alves, G. E., Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Siqueira, V. C., Cirillo, M. Â., & Pinto, A. C. F. (2017). <b>Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. *Acta Scientiarum. Agronomy*, *39*(2), 225–233. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i2.31065

Andrade, P. S. de, Duarte, C. R., & Barrozo, M. A. de S. (2024). Improving the quality of Arabica coffee (Coffea arabica L.) through innovative optimization of roto-aerated drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *96*, 103770. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2024.103770

Arce, R. (2024). Normas ambientales voluntarias, acciones de mitigación nacionalmente apropiadas y Pacto Verde: Elementos para la discusión en el caso del sector caficultor. *Revista de Política Económica y Desarrollo Sostenible*, *10*. https://doi.org/https://doi.org/10.15359/7f6jx993/

Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L. F., & Hincapié, E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia. *Sistemas de producción de café en Colombia*, 234–254. https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720

Arcila-Pulgarin, J. (1976). Influencia de la temperatura de secado en la germinación de las semillas de café. *Cenicafé*, *27*(2), 89–91. https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/999

Benavides, P., Gil-Palacio, Z. N., Constantino, L. M., Villegas, C., & Giraldo-Jaramillo, M. (2013). *Plagas del café: broca, minador, cochinillas harinosas, arañita roja y monalonion. 2*, 215–260. https://doi.org/10.38141/CENBOOK-0026_24

Besora, J. (2017). Secador solar de café, informe técnico para la construcción de un secador solar de café. *Ingeniería Sin Fronteras*. https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/04/Informe-t%C3%A9cnico-secador-solar-de-caf%C3%A9.pdf

Borém, F. M., Pedroza Isquierdo, E., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., Henrique, J., & Taveira, S. (2018). QUALITY OF NATURAL COFFEE DRIED UNDER DIFFERENT TEMPERATURES AND DRYING RATES. *Coffee Science* , *13*(2), 159–167. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.25186/cs.v13i2.1410

Bravo, D. A., Acuña, W., & Pito, J. C. (2022). Prototipo para el control de temperatura y humedad en el secado mecánico del café. *Ingeniería y Desarrollo*, *40*(1), 28–46. https://doi.org/10.14482/INDE.40.01.621.004

Carvalho, J. M., Paiva, E. L., & Vieira, L. M. (2016). Quality attributes of a high specification product: Evidences from the speciality coffee business. *British Food Journal*, *118*(1), 132–149. https://doi.org/10.1108/BFJ-02-2015-0059/FULL/XML

Casé, I. (2022). *Processos alternativos de secagem do café arábica* [Universidade Federal de Uberlândia]. https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/34899

Cenicafé. (2004). *Beneficio del café ll: Secado del café pergamino* (pp. 174–190). https://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf

Cheng, K., Dong, W., Long, Y., Zhao, J., Hu, R., Zhang, Y., & Zhu, K. (2019). Evaluation of the impact of different drying methods on the phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro digestion of green coffee beans. *Food Science & Nutrition*, *7*(3), 1084–1095. https://doi.org/10.1002/FSN3.948

Colak, N., & Hepbasli, A. (2009). A review of heat pump drying: Part 1 – Systems, models and studies. *Energy Conversion and Management*, *50*(9), 2180–2186. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2009.04.031

Comité Nacional de Cafeteros. (2016). *Resolución 02 de 2016*.

Comité Nacional de Cafeteros. (2019). *Identifique los Defectos del Café*.

Coradi, P. C., Borém, F. M., Saath, R., & Marques, E. R. (2007). Effect of drying and storage conditions on the quality of natural anda washed coffee. *Coffee Science*, *2*(1). http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/5624

Corrêa, P. C., Horta, G. H., Botelho, F. M., Duarte, A. L., & Carvalho, F. M. (2010). Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem. *Revista Ceres*, *57*(5), 595–601. https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500005

Cortés, M., & Ladino, O. (2016). Elaboración de una bebida alcohólica usando subproductos del proceso de beneficio del café (pulpa de café). *Revista Nova*, *2*, 44–49. https://doi.org/10.23850/25004476.619

Dartico S.A.S. (2009). *MANUAL DEL USUARIO PARA SECADOR DE BOMBA DE CALOR CON CIRCUITO DE OPERACIÓN CERRADO REFERENCIA DSBC1*.

Dávila, N. E. (2012). *Caracterización del proceso de biosorción de metales pesados mediante residuos sólidos de café* [Universidad Autónoma de Nuevo León]. http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080237535.pdf

Díaz, J. (2018). *Secado de café pergamino con tambor rotatorio usando deshumidificación con bomba de calor y con compresor tipo Inverter* [Instituto Tecnológico Metropolitano]. https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/5842

Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2017). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*, *234*, 121–130. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.04.156

Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019a). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry*, *272*, 723–731. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.08.068

Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019b). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-

GC-MS. *Food Chemistry*, *272*, 723–731. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.08.068

Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019c). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry*, *272*, 723–731. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.08.068

Escobar, W. J., & Pantoja De La Cruz, E. C. (2016). *Sistema automatizado para el control de la temperatura y humedad relativa de un secador solar de café* [Universidad de Nariño]. https://sired.udenar.edu.co/8394/

Espinosa-Sandoval, L., Ormaza, A., & Ayala-Aponte, A. (2016). EVALUACIÓN DEL SECADO DE MELON (Cucumis melo L.) MEDIANTE SECADO CONVECTIVO Y BOMBA DE CALOR. *Vitae*, *23*, 236–240. https://www.proquest.com/openview/59659171e5fd46fbcf915bf1edbdeccc/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1806352

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2014). *Economía cafetera: Ensayos sobre economía cafetera No. 30* (moderna y competitiva Caficultura sostenible, Ed.).

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2023). *INFORME DE GESTIÓN 2023*. https://doi.org/10.38141/10793

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2024). *INFORME DE GESTIÓN 2023*. https://doi.org/10.38141/10793

Goh, L. J., Othman, M. Y., Mat, S., Ruslan, H., & Sopian, K. (2011). Review of heat pump systems for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(9), 4788–4796. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.072

Gómez-Daza, J. C. (2023). Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios. *Revista Ing-Nova*, *2*(2), 132–145. https://doi.org/10.32997/RIN-2023-4345

Gómez-Daza, J. C., & Ochoa-Martínez, C. I. (2012). SECADOR ASISTIDO POR BOMBA DE CALOR Y SECADOR CONVECTIVO CON RECIRCULACI”N TOTAL: ALTERNATIVAS PARA EL SECADO DE MATERIALES AGROALIMENTARIOS. *Vitae*, *19*(1), S36–S38. https://www.redalyc.org/pdf/1698/169823914004.pdf

Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Morales-Ramos, V., Marín-Garza, T., & Crosby-Galván, M. M. (2018). NUTRITIONAL ASSESSMENT OF ROBUSTA COFFEE (Coffea canephora) BEANS OF DIFFERENT ORIGINS PROCESSED IN MEXICO. *Agroproductividad*, *11*(4), 25–29. https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/download/264/194

González-Salazar, C. A., Sanz-Uribe, J. R., & Oliveros-Tascón, C. E. (2010). Control de caudal y temperatura de aire en el secado mecánico de café. *Cenicafé*, *61*(4), 281–296. https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/503

Guevara-Sánchez, M., Bernales del Águila, C. I., Saavedra-Ramírez, J., & Owaki-López, J. J. (2019). Efecto de la altitud en la calidad del café (Coffea arabica L.): comparación entre secado mecánico y tradicional. *Scientia Agropecuaria*, *10*(4), 505–510. https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2019.04.07

Gutiérrez-Flórez, J. M., & Copete-López, H. (2009). Hacia la Mejora del Secado Mecánico del Café en Colombia. *Tecnológicas*, *23*, 132. https://doi.org/10.22430/22565337.241

Henao, J. (2016). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza* [Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56186

Henrique, J., Taveira, D. S., Borém, F. M., Delyzette, S., Da Rosa, V. F., Oliveira, P. D., Giomo, G. S., Isquierdo, E. P., & Fortunato, V. A. (2016). *Post-harvest effects on beverage quality and physiological performance of coffee beans. 10*(12), 1457–1466. https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9263

ICO. (2022). *Anuario Año cafetero 2021/2022*. https://icocoffee.org/documents/cy2022-23/annual-review-2021-2022-c.pdf

ICO, & UNIDO. (2024). *Sustainability & resilience of the coffe global value chain: towards a coffee investment vehicle*. https://www.icocoffee.org/documents/cy2023-24/report-global-coffee-funding-mechanisms-june-2024-e.pdf

Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Fang, M., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2022). Effect of post-harvest drying process on chlorogenic acids, antioxidant activities and CIE-Lab color of Thai Arabica green coffee beans. *Food Chemistry*, *366*, 130504. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.130504

Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chemistry*, *291*, 49–58. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.03.152

Kumar, D., Mahanta, P., & Kalita, P. (2020). Energy and exergy analysis of a natural convection dryer with and without sensible heat storage medium. *Journal of Energy Storage*, *29*, 101481. https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101481

Largo, E. (2020). *Efecto del secado solar intermitente en la composición química del café* [Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79488

Largo-Avila, E., Suarez-Rodríguez, C. H., Montero, J. L., Strong, M., & Juan, O.-A. (2023). The influence of hot-air mechanical drying on the sensory quality of specialty Colombian coffee. *AIMS Agriculture and Food 2023 3:789*, *8*(3), 789–803. https://doi.org/10.3934/AGRFOOD.2023042

López Fontal, E. M. (2006). Secado de café en lecho fluidizado. *Ingeniería e Investigación*, *26*(1), 25–29. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092006000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Madrid, O. L. (2017). *Efecto de diferentes humedades relativas y tipos de plastificantes en el proceso de secado de cápsulas blandas de gelatina* [Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59232

Manrique, R., Vásquez, D., Chejne, F., & Pinzón, A. (2020). Energy analysis of a proposed hybrid solar–biomass coffee bean drying system. *Energy*, *202*, 117720. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117720

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023, junio 27). *Café: Producto Insignia de Colombia para el Mundo*. Café: Producto Insignia de Colombia para el Mundo. https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/CafeProductoInsigniaColombiaMundo.aspx

Mohanraj, M., Belyayev, Y., Jayaraj, S., & Kaltayev, A. (2018). Research and developments on solar assisted compression heat pump systems – A comprehensive review (Part A: Modeling and modifications). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *83*, 90–123. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.08.022

Moreno, A., & Rodríguez, Y. (2022). *Evaluación de dos Técnicas de Secado de Café (Silo / Guardiola) en la Finca Santa Isabel, Vereda Hoya de San José, Municipio de Socorro, Santander*. [Universidad Industrial de Santander]. https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/0870a60e-d4d8-4479-8d8b-593633426700/content

Muñoz, K. S., & Vivas, D. (2015). *Aplicación del sistema de bomba de calor en el secado de arracacha (Arracacia xanthorrhiza)* [Universidad del Valle]. https://hdl.handle.net/10893/17702

Norma Técnica Colombiana NTC 2325:2005, Pub. L. No. 2325:2005, 2005 1 (2005).

Norma Técnica Colombiana NTC 5938:2024, Pub. L. No. 5938:2024, 2024 1 (2024).

Oliveros, C. E., Pabón, J. P., Trujillo, A. F., & Ramírez, C. A. (2016a). AT-470 Evaluacion Practicas Conservacion Cafe Humedo. *Avances Técnicos Cenicafé, Evaluación de prácticas utilizadas en la conservación del café húmedo-AT470*, 1–8. https://caldas.federaciondecafeteros.org/app/uploads/sites/11/2020/08/AVT0470-Evaluaci%C3%B3n-de-pr%C3%A1cticas-utilizadas-en-la-conservaci%C3%B3n-del-caf%C3%A9-h%C3%BAmedo.pdf

Oliveros, C. E., Pabón, J. P., Trujillo, A. F., & Ramírez, C. A. (2016b). AT-470 Evaluacion Practicas Conservacion Cafe Humedo. *Avances Técnicos Cenicafé, Evaluación de prácticas utilizadas en la conservación del café húmedo-AT470*, 1–8. www.cenicafe.org

Ordoñez, K. L., & Sepúlveda, Camila. (2020). *Caracterización físico química de los residuos del plátano y el café para su posible uso como materias primas en la fabricación de papel* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. http://hdl.handle.net/11349/24795

Ortiz García, J. E., González Morales, D. E., Mejía Agudelo, Y., García-Alzate, L. S., & Cifuentes-Wchima, X. (2020). Evaluación de la biomasa residual (cereza) de café como sustrato para el cultivo del hongo comestible Pleurotus ostreatus. *Revista ION*, *33*(1). https://doi.org/10.18273/REVION.V33N1-2020009

Ospina, A. (2017). *La industria de los cafés de especialidad. Relación entre certificaciones de calidad o especialidad, y los ingresos de los caficultores en Colombia. 1989 - 2015* [Universidad del Rosario]. https://doi.org/https://doi.org/10.48713/10336_13770

Pabón, J., & Osorio, V. (2019). Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café. *Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila*, 162–187. https://doi.org/10.38141/10791/0005_7

Pabón, J., & Osorio, V. (2022). Efecto de la interrupción del secado mecánico en la calidad física y sensorial del café. *Revista Cenicafé*, *73*(2), e73201–e73201. https://doi.org/10.38141/10778/73201

Pabón, J., & Osorio, V. (2024). Interrupción del secado mecánico del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, *562*, 1–8. https://doi.org/10.38141/10779/0562

Parra Coronado, A., Roa Mejía, G., Oliveros Tascón, C., & Sanz Uribe, J. (2017). *Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino 1*. https://www.cenicafe.org/es/publications/librosecado.pdf

Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G., & Oliveros-Tascón, C. E. (2008). SECAFÉ Parte II: recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *12*(4), 428–434. https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400014

Pastrana, J., & Mora, N. (2017). Evaluación de la capacidad de adsorción del residuo de café molido en la remoción de Mercurio (II) en matrices acuosas [Universidad de Nariño]. En *Sensors and Actuators, B: Chemical* (Vol. 182). https://doi.org/10.1016/J.SNB.2013.02.102

PATIÑO-VELASCO, M. M., PENCUE-FIERRO, E. L., & VARGAS-CAÑAS, R. (2016). DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN GRANOS DE CAFÉ PERGAMINO SECO UTILIZANDO SPECKLE DINÁMICO. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *14*(2), 84–91. https://doi.org/10.18684/BSAA(14)84-91

Perafán, A., & Restrepo, L. M. (2023). Caracterización de la caficultura en Trujillo, Valle del Cauca, Colombia. *Ciencia Nueva, revista de Historia y Política*, *7*(2), 29–54. https://doi.org/10.22517/25392662.25300

Phitakwinai, S., Thepa, S., & Nilnont, W. (2019). Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food Science & Nutrition*, *7*(9), 2921–2931. https://doi.org/10.1002/FSN3.1144

Prada, Á., Vela, C. P., Bardález, G., Saavedra, J., Cooperativa,), Cafetalera, A., Carretera, A., Belaúnde, F., Km, T., & Martín, S. (2019). Effectiveness of a Coffee Drying Process Using Solar Dryers with a Continuous Air Flow System Powered by Photovoltaic Energy, in the San Martín Region, Peru. *Información tecnológica*, *30*(6), 85–92. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600085

Puerta, G. I. (2013). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. *Cenicafé*, 8. https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/418

Puerta-Quintero, G. (2000). Calidad en taza de algunas mezclas de variedades de café de la especie Coffea arabica L. *cenicafé*, *51*(1), 5–19. https://cenicafe.org/es/publications/arc051(01)005-019.pdf

Puerta-Quintero, G. I. (2008). Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado. *Avances Técnicos Cenicafé*, 1–8. https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/399

Quintanar, J., & Roa, R. (2017). Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *8*(2), 321–331. https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V8I2.53

Rivillas, C. A., & Gaitan, Á. L. (2013). Germinadores de café. *Cenicafé*, *2*, 8–13. https://doi.org/10.38141/CENBOOK-0026_14

Rivillas, C. A., Hoyos, A. M., & Ramírez, I. C. (2017). Manejo de la roya: Nuevo fungicida para su control en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, *480*, 1–4. https://doi.org/10.38141/10779/0480

Rojo, E. (2014). Café I (G. Coffea). *Reduca (Biología). Serie Botánica*, *7*(2), 113–132. https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/27030672-4b74-4df3-8a7b-eee39b14d1a2/content

Shibamoto, T. (2015). Volatile Chemicals from Thermal Degradation of Less Volatile Coffee Components. *Coffee in Health and Disease Prevention*, 129–135. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00014-0

Siagian, P., Napitupulu, F. H., Setyawan, E. Y., Siagian, L., Napitupulu, R. A. M., & Ambarita, H. (2018). Analysis of temperature and velocity distributions in a solar drying box coffee beans. *Materials Science and Engineering*, *420*(1), 012035. https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012035

Singh, A., Sarkar, J., & Sahoo, R. R. (2020a). Experimental energy, exergy, economic and exergoeconomic analyses of batch-type solar-assisted heat pump dryer. *Renewable Energy*, *156*, 1107–1116. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.04.100

Singh, A., Sarkar, J., & Sahoo, R. R. (2020b). Experimental performance analysis of novel indirect-expansion solar-infrared assisted heat pump dryer for agricultural products. *Solar Energy*, *206*, 907–917. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.06.065

Siqueira, V. C., Borém, F. M., Alves, G. E., Isquierdo, E. P., Pinto, A. C. F., Ribeiro, D. E., & Ribeiro, F. C. (2017). Drying kinetics of processed natural coffee with high moisture content. *Coffee Science*, *12*(3), 400–409. http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/9131

Specialty Coffee Association. (2024). *Coffee Value Assessment — Specialty Coffee Association*. https://sca.coffee/value-assessment/#keydocuments

Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2025a). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *210*, 115263. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.115263

Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2025b). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *210*, 115263. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.115263

UPRA. (2024, agosto 22). *El sector agropecuario impulsa el crecimiento del PIB en el segundo trimestre de 2024*. https://upra.gov.co/es-co/saladeprensa/Paginas/El-sector-agropecuario-impulsa-el-crecimiento-del-PIB-en-el-segundo-trimestre-de-2024.aspx

Velásquez, C., & Trávez, M. (2019). *Café especial, una alternativa para el sector cafetero en Colombia* [Universidad EAFIT]. https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/351af8f6-b97c-4632-8867-eb71f41506b0/content

Yahya, M., Fudholi, A., Hafizh, H., & Sopian, K. (2016). Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava. *Solar Energy*, *136*, 606–613. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.07.049