


Procesos de secado del café y su impacto en la industria

Coffee drying processes and their impact on the industry

Querima Moseley¹, Oscar Colindres¹, Cristhian Caballero¹, Adrián Serrano^{1*}, José Gallardo¹, Iveth Moreno¹, José Serracín¹

¹ Grupo de Investigación Aplicada a la Calidad del Café, Universidad Tecnológica de Panamá

*Autor de correspondencia: adrian.serrano@utp.ac.pa

RESUMEN. El secado es una de las etapas más cruciales para garantizar la calidad e inocuidad del café. Se ha evidenciado que diferentes tipos de superficies y técnicas utilizadas en el secado solar pueden afectar a la calidad final del café. El secado tradicional solar en particular es afectado por las condiciones climáticas del sitio donde se realiza, entre ellas la humedad y la temperatura; existen otros métodos utilizados en la industria para contrarrestar estas desventajas. En este artículo se explora la literatura existente acerca del funcionamiento de distintas maneras de aplicar el secado solar (sobre distintas superficies y con cubiertas), diferentes tipos de secado mecánico (secadoras rotativas, de capa estática, silo-secadores y secadores en lecho fluidizado); así como la posibilidad teórica de utilizar la liofilización en granos de café para el secado en lugar de café soluble instantáneo, que es la aplicación utilizada históricamente. Los métodos mecanizados de secado presentan tiempos menores de secado, sin embargo, la calidad del café comienza a disminuir si se sobrepasan los 40°C. Si bien la liofilización tiende a conservar mejor sabores y aromas, también se incurren en mayores gastos de producción, por lo que su aplicación como método alternativo de secado se ha seguido limitando al café comercial a pesar de sus ventajas respecto a la calidad del producto final.

Palabras clave. *Secado de café, secado en frío, secado solar, secado mecanizado, guardiolas.*

ABSTRACT. Drying is one of the most crucial stages to ensure the quality and safety of coffee. It has been evidenced that different types of surfaces and techniques used in solar drying can affect the final quality of coffee. Traditional solar drying, is particularly influenced by the climatic conditions of the site where it is carried out, including humidity and temperature; there are other methods used in the industry to counteract these advantages. This article explores existing literature on the performance of different ways of applying solar drying (on different surfaces and with covers), different types of mechanical drying (rotary dryers, static layer dryers, dryer silos and fluidized bed drying); as well as the theoretical possibility of using freeze-drying on coffee beans for drying instead of instant soluble coffee, which has been historically used. Mechanical drying methods tend to have shorter drying times; however, the quality of coffee starts to decrease if the temperature exceeds 40°C. While freeze-drying tends to better preserve flavours and aromas, it also incurs higher production costs, limiting its application as an alternative drying method in commercial coffee despite its advantages in terms of final product quality.

Keywords. *Coffee drying, freeze drying, solar drying, mechanical drying, rotary dryers.*

1. Introducción

La historia del café remonta al año 1671, cuando se dice que un pastor de cabras observó que sus animales se comportaban de una manera frenética al comer unas cerezas rojas, y que esto llevo a que el café fuera

descubierto [1]. A pesar de que la historia de Kaldi no sea más que un mito, nos da una perspectiva del como inició el café, convirtiéndose hoy en día en una industria que representa un mercado de 88 mil millones de dólares [2] que al día de hoy más exigente en sus márgenes de calidad [3], por lo que es necesario indagar en la manera

Citación: Q. Moseley, O. Colindres, C. Caballero, A. Serrano, J. Gallardo, I. Moreno y J. Serracín, "Procesos de secado del café y su importancia en la industria", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 2, pp. (0), 2024.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 18 de noviembre de 2023. **Recibido con correcciones:** 13 de marzo de 2024. **Aceptado:** 13 de marzo de 2024.

DOI: <https://doi.org/10.33412/idt.v20.2.4059>

Copyright: 2024 Q. Moseley, O. Colindres, C. Caballero, A. Serrano, J. Gallardo, I. Moreno y J. Serracín. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

en que se realizan los procesos en el café. Este artículo presenta las distintas maneras en que puede ser procesado el café, enfocándose en el secado.

1.1 Cosecha y procesos del café

El café comienza su trayectoria desde la finca hasta la taza como un árbol frutal que tiene dos especies que se comercializan popularmente, *Coffea Arabica* y *Coffea Canephora* [4], se conocen comúnmente como Café Arábica y Robusta correspondientemente. La cereza del café está compuesta por distintas capas, que se pueden observar en la figura 1.

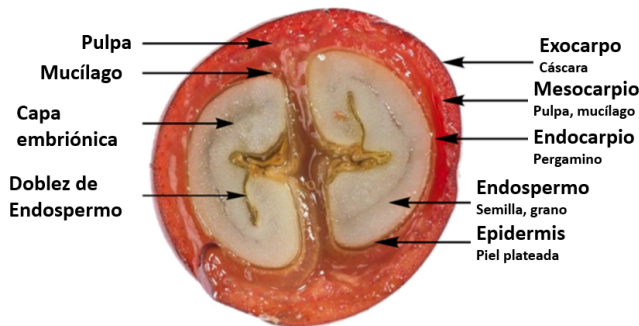


Figura 1. La anatomía de una cereza de café [5]

Los métodos tradicionales de procesamiento del café son el húmedo y seco. En el proceso seco la cereza se deja intacta y se seca, mientras que en el húmedo la semilla es separada de la pulpa y lavada hasta eliminar el mucílago que la cubre. También existe el proceso semihúmedo o mejor conocido como honey, donde el mucílago se conserva completa o parcialmente para aportar sabores distintos al café [6]. El café entonces es secado hasta alcanzar una humedad de 10-12% [7]. El contenido de humedad en el café antes de secarse varía según las condiciones y el proceso. Después del secado, se reposa para estabilizarse y se pila para quitar la cáscara, obteniendo así el café oro o verde, listo para tostar y y después de unos días de reposo, llegar a nuestras tazas [8].

1.2 Migración de humedad en el café

Para entender el efecto del secado en el café, es importante abordar brevemente el proceso físico del secado, incluyendo cómo ocurre y los cambios que experimenta el café. El secado en el café se debe a la difusión de vapor y líquido, donde la humedad migra desde áreas con mayor humedad hacia zonas con menor humedad, en busca de equilibrio en el sistema [9]. Esto

sucede de forma macroscópica al migrar la humedad hacia afuera del café e internamente migrando entre las capas del café [10], este proceso es mejor conocido como absorción y desorción. Las magnitudes clave para describir estos procesos son la actividad del agua, que indica el contenido de vapor de agua en el material, y la humedad relativa, que refleja el contenido de vapor de agua libre en el ambiente. La velocidad de estos procesos se ve influenciada por factores como la vibración, la velocidad del viento, la temperatura y la permeabilidad del café [11].

1.2.1 Fases del secado

El secado se divide en dos fases: constante y decadente. En la fase constante, la humedad migra uniformemente en el tiempo, mientras que, en la fase decadente, la velocidad de migración del agua disminuye con el tiempo. Esta última etapa requiere más energía y tiempo para completarse. La mayor parte del secado ocurre en la fase decadente [12].

1.2.2 Cambios físicos al café

Los cambios físicos en el café son una forma clave para que los productores monitoreen los cambios de humedad durante el secado. Uno de los cambios más evidentes es el encogimiento del grano, similar al que ocurre en las pasas y otras frutas secas de manera natural. Esto se debe al colapso de las estructuras celulares del café a medida que se elimina el agua, lo que provoca una reducción en su tamaño [13].

Al eliminar el agua que le otorga su elasticidad, el grano de café se vuelve menos flexible con el tiempo [14], y los productores prueban su elasticidad de forma artesanal mordiendo el café. Esta observación física también sirve como base para algunas pruebas cualitativas que ayudan a determinar el contenido de humedad final del café de forma empírica.

1.2.3 Cambios químicos y riesgos

La calidad del café es crucial debido a la gran cantidad de compuestos volátiles presentes en él, con más de 900 identificados. Sin embargo, solo alrededor del 5% de estos son perceptibles por el olfato humano. La calidad del café se ve influenciada por las condiciones de secado, especialmente la temperatura, humedad y lluvia. Una humedad excesiva durante el secado puede provocar la formación de hongos que pueden contaminar el café [15].

La producción de hongos es uno de los principales problemas que se pueden presentar, ya que estos pueden producir toxinas como la Ochratoxina A y contaminar el café [16].

2. Objetivo Principal

La finalidad de este artículo es explorar la literatura existente relacionada a distintos métodos de secado utilizados en la industria cafetalera, sus ventajas y posibles limitaciones relacionadas a la calidad fisiológica y sensorial del café.

3. Metodología

Este artículo se basa principalmente en la literatura encontrada en las bases de datos de Google Scholar y Scielo. Los artículos citados en este estudio fueron seleccionados para ofrecer una visión sobre investigaciones recientes relacionadas a distintos métodos de secado de café. Se utilizaron términos de búsqueda asociados a los procesos postcosecha de café como “secado de café”, “secado solar”, “secado mecánico”, “secado en frío”; y características como “contenido de humedad”, “calidad fisiológica” y “calidad sensorial”. Luego de una investigación y estudio detenido, se identificaron 75 artículos elegibles para el informe.

4. Secado solar

El secado solar es predominantemente usado en países que se están desarrollando, y se considera que utilizar otros tipos de secado puede traer problemas al grano como el sobre secado [17].

El secado solar de café es un proceso tradicional de secado que data de los inicios del café, ya que es el método más natural y evidencias de este método datan de los 1700-1800s [1]. Este método consiste en una migración de la humedad dentro de la fruta del café hacia el medio que lo rodea debido a las condiciones ambientales y utiliza como su energía principal la radiación solar y el viento [18].

Tradicionalmente en este proceso los productores colocan el café en una superficie plana a la intemperie, bajo un techo o una carpa translúcida, donde éste reposa hasta alcanzar la humedad final en un plazo que usualmente varía entre 7 y 21 días, dependiendo de las condiciones ambientales, el tipo de proceso y las prácticas de secado [19]. A pesar de que aparentemente, existe poco que pueda hacer el productor para cambiar

sus resultados de secado, hay variaciones del método que pueden realizarse que cambian significativamente la calidad y el tiempo que toma secar el café [20], (algunas de estas pueden ser el tipo de superficie en que el café es secado [21]), existen muchos tipos de superficies que pueden utilizarse para secar, pero los más comunes son en “patios” [22] de concreto y en mallas plásticas que se encuentran suspendidas, ambas están en la figura 2.



Figura 2. Secado en mallas suspendidas (izquierda) y en concreto (derecha) [23]

De forma general, el utilizar mallas para el secado permite que exista mejor flujo de aire alrededor del café, ya que por los orificios de la malla puede tener contacto con el aire, y así mismo la humedad puede separarse del café de manera más rápida, a diferencia del patio de concreto, donde el aire solamente puede tener mayor contacto con el café desde la superficie de la capa [24]. Más adelante se discutirá más acerca del uso de estas dos técnicas y el efecto que pueden tener en el secado del café.

4.1. Prácticas utilizadas durante el proceso de secado

El propósito principal del secado es transferir la humedad eficientemente. Si no se logra correctamente, pueden surgir problemas como la formación de hongos y la pérdida de calidad en el café. La humedad puede quedar atrapada en las capas internas del café, lo que requiere intervención manual durante el secado solar. A continuación, se discutirán algunas soluciones para evitar estos problemas [25].

4.1.1. Secado Solar mediante uso de rastrillo

Una de las prácticas más utilizadas durante el secado solar es el uso de rastrillos para mover el café sobre concreto y liberar la humedad que se encuentra entre los granos, esto es un paso sencillo pero muy importante para poder evitar las formaciones de hongos y mantener la calidad del café [26], en 2010 Velmourougane comprobó que la frecuencia de “rastrilleos” tiene efecto sobre las incidencias de moho y la contaminación de toxinas durante el secado solar en distintas superficies [27].

4.1.2. Densidad de carga

La densidad de carga es la capacidad en kilogramos por metros cuadrados que puede soportar un espacio de secado [28]. La influencia de la densidad de carga en el secado del café ha sido investigada por Tsegaye et al. [29] y Kouadio et al. [30]. Tsegaye et al. observaron que cargas más ligeras (20-30 kg/m²) resultaron en una mejor calidad de café, mientras que cargas más altas (40 kg/m²) deterioraron la calidad y prolongaron el tiempo de secado. Por otro lado, Kouadio et al. examinaron la relación entre densidades de carga y la formación de hongos y contaminación de OTA. Cargas de 10 y 20 kg/m² no mostraron desarrollo de hongos, pero el porcentaje de hongos aumentó con cargas más altas. Además, la duración del secado disminuyó con cargas más bajas. Estos hallazgos resaltan la importancia de la densidad de carga en el proceso de secado del café.

4.2. Modificaciones que optimizan el secado

Para optimizar el secado se pueden utilizar diversas aplicaciones tecnológicas que mejoren las condiciones de secado del café sin agregar otras fuentes de energía, a continuación, discutiremos algunas de estas [31].

4.2.1. Distintas superficies de secado

Como mencionamos anteriormente, las superficies de secado tienen un efecto significativo en el secado, ya que son el medio donde reposa el café y pueden afectar no solamente la transferencia de humedad, sino que también podría ser una fuente de contaminantes si no existe un manejo adecuado, por esto la superficie de preferencia para secar café son las mallas ya que al estar suspendidas eliminan el contacto con el suelo y disminuyen la contaminación [25]. Además, en los experimentos mencionados anteriormente [27] [29] se evalúa la calidad del café secado en distintas superficies donde la que resulta superior es el secado utilizando mallas. Sin embargo, en [30]. Los autores comparan superficies como son el suelo, el concreto y las lonas, donde las lonas obtuvieron los mejores resultados. Esta puede servir como una alternativa más económica para un productor que no tenga acceso a la infraestructura necesaria para secar en camas suspendidas.

4.2.2. Uso de cubiertas

Las superficies de secado juegan un papel crucial en el proceso, ya que afectan la transferencia de humedad y pueden ser fuentes de contaminación. Una forma de proteger el café es cubrirlo con una estructura de forma parabólica y revestida de plástico, que puede abrirse para

permitir el flujo de aire o cerrarse para evitar riesgos ambientales. Un ejemplo es la estructura recomendada por Cenicafé que se puede observar en la figura 3, adaptable a diferentes superficies de secado.



Figura 3. Cubierta plástica parabólica para secar café [5]

También, pueden existir otras maneras de realizar esta práctica, como la utilización de invernaderos, techos y otras cubiertas. Como se puede apreciar en la figura 4.



Figura 4. Secado en invernadero [10]

5. Secado Mecanizado

El secado de café es comparativamente más difícil de ejecutar por su alto contenido de humedad inicial tras ser cosechado [32]; en comparación a otros productos agrícolas como los frijoles negros [33] o el arroz [34]. El 88% de los productores de café del mundo están localizados sobre la línea del Ecuador denominada “el cinturón de café” [35], con las regiones de mayor altitud siendo asociadas a café de mayor calidad [14] [36]. Por lo que poseen condiciones climáticas variables para el secado solar de café, ya sea por baja temperatura [37], alta humedad relativa [38], bajo brillo solar [39], entre otras características que terminan afectando el tiempo total del secado e influyendo en la calidad e inocuidad del producto final [40]. Por ende, en algunos países como Colombia, los caficultores consideran el uso de secadores de baja capacidad estática para reemplazar al secado solar o utilizarlo como complemento [41]. Existen diferentes equipos para el secado con equipo industrializado, pero se debe considerar que no siempre la tecnología más utilizada es la mejor alternativa, en especial para productores de menor escala [42].

5.1. Secadoras rotativas

Las secadoras rotativas, conocidas también como guardiolas, son uno de los métodos más conocidos en la industria del café [43]. Estas secadoras son utilizadas comúnmente en beneficios de café industriales [44]. Estas funcionan utilizando temperaturas relativamente bajas de secado y un alto flujo de aire para disminuir el contenido de humedad de los granos [45]. Una secadora rotativa tiene un tambor cilíndrico horizontal dividido en secciones; el aire caliente entra a través de un conducto central y seca los granos mientras el tambor gira lentamente, y finalmente el aire húmedo sale a través de los agujeros en cada uno de los cilindros como se puede observar en la figura 5. Esto asegura que los granos se sequen de manera uniforme gracias a su movimiento en diferentes direcciones [41].



Figura 5. Secadora rotativa marca Penagos [46]

En el año 2020, el Central Coffee Research Institute de Mysore, India; realizó un estudio comparando el secado solar tradicional con secado en guardiolas para café robusta de proceso natural y proceso lavado. Las muestras de café fueron secadas a 40°C, 50°C y 60°C para demostrar los efectos de la temperatura de secado en la calidad final de la taza [47].

El café robusta natural se secó durante diferentes periodos a temperaturas entre 40°C y 60°C en la guardiola, además de aproximadamente 15 días al sol. El café lavado también se secó a temperaturas similares, junto con más de siete días al sol. Se encontró que el café robusta lavado secado tradicionalmente obtuvo la mejor puntuación sensorial, seguido por muestras secadas en guardiolas a diferentes temperaturas. En cuanto al café natural secado tradicionalmente, también obtuvo una buena puntuación, seguido por muestras secadas en guardiolas a distintas temperaturas. Este estudio destaca la importancia de no exceder los 40°C para mantener la calidad sensorial del café con secadoras rotativas [48]. Un estudio similar fue desarrollado en la universidad Federal de Larvas en Brasil, donde se evaluó las características fisicoquímicas y sensoriales de café

arábigo mediante diferentes métodos de secado. El café secado en guardiolas presentó valores más bajos de azúcar total y azúcar no reductores en comparación a los métodos de secado solar [49]. Otro estudio del mismo autor señala que la reducción de azúcares está directamente relacionada con una disminución en la calidad del café [50].

5.2. Secadores de capa estática y silo-secadores

Los secadores de capa estática, también conocidos como secadores de capa fija, fueron desarrollados en conjunto con los silo-secadores en Colombia por el Cenicafe en la década de 1970 con el fin de reemplazar a las guardiolas [41]. Estos secadores están compuestos de 1 a 3 cámaras colocadas horizontalmente para los secadores de capa fija y verticalmente para los silo-secadores. Ambos funcionan bajo mismo principio de dirigir el aire caliente con un ventilador a la parte inferior del secador para que este fluya inversamente a través de las cámaras [51].

En los secadores de capa fija, el flujo de aire atraviesa la capa de granos en dos direcciones, de arriba hacia abajo y viceversa, lo que ayuda a disminuir los gradientes de humedad para cada capa de granos, como se aprecia en la figura 6 [52].

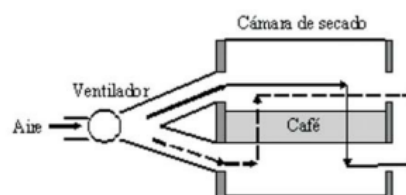


Figura 6. Secador de una sola capa, con inversión de flujo de aire [53]

Según Borém, el tiempo de exposición, el contenido de humedad inicial del producto, la temperatura y el flujo de aire impactan la dinámica de secado y en la calidad de los productos agrícolas [54].

En 2017, se llevó a cabo un experimento para evaluar la calidad fisiológica y sensorial del café arábigo bajo diferentes temperaturas y flujos de aire. Se encontró que, aunque el flujo de aire no afecta las características fisiológicas del café, a 40°C, un aumento en el flujo de aire está correlacionado negativamente con la calidad sensorial del café despulpado [55].

El silo-secador se compone de una cámara de secado principal y una o dos cámaras de pre secado en la parte superior, como se observa en la figura 7. En estos

secadores el aire caliente fluye desde la cámara de secado hacia arriba. Cuando los granos en la cámara de secado alcanzan el nivel de humedad deseado, se retiran y los granos en las cámaras superiores descienden a un nivel inferior para continuar el proceso [56].

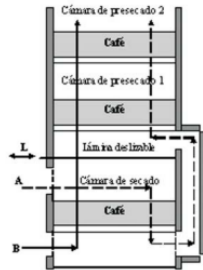


Figura 7. Silo-secador de tres pisos verticales [53].

La Universidad Nacional de Colombia empleó un silo-secador de tres cámaras para estudiar el efecto del secado y pre-secado en muestras de café pergamino. Según los resultados, usar el silo-secador para el secado completo es tan efectivo como emplearlo como complemento al secado solar tradicional. Esto se debe a que el silo-secador puede reducir gradualmente el contenido de humedad del grano mediante las cámaras de pre-secado, evitando cambios bruscos que puedan afectar su calidad [57].

5.3. Secador en lecho fluidizado

La fluidización ocurre cuando un gas que fluye hacia arriba impone una fuerza de arrastre lo suficientemente alta como para superar la gravedad y suspender partículas en el aire. Esto genera que las partículas suspendidas se comporten de una manera similar a un fluido [58].

La variación de secado mecánico por lecho fluidizado funciona al exponer a los granos a elevados caudales de aire caliente con el fin de suspender una capa de granos en el aire y conseguir un secado rápido y uniforme [56] como se puede observar en la figura 8.

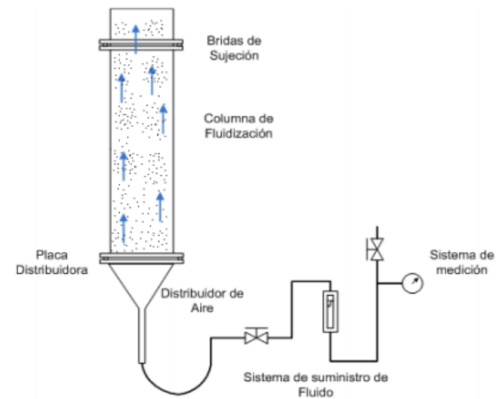


Figura 8. Silo-secador de tres pisos verticales [59]

Se realizó un estudio de secado de café en lecho fluidizado a temperaturas de 42°C, 46°C y 49°C, con tiempos totales de secado de 6 a 8 horas. Los resultados mostraron curvas de secado uniformes para los tres tratamientos. En el análisis sensorial, utilizando una escala del 1 al 5 donde se considera aceptable cualquier puntuación mayor o igual a 3, el café secado a 46°C y 49°C obtuvo 3 puntos, mientras que el secado a 42°C obtuvo 4 puntos. En conclusión, el secado en lecho fluidizado preserva las características organolépticas del café y logra una uniformidad satisfactoria en el contenido de humedad final del grano [60].

6. Secado en frío

6.1. Concepto de liofilización

El proceso de liofilización conserva el producto sin necesidad de cadena de frío y sin alterar su estructura fisicoquímica, intensificando sus sabores y aromas mientras mantiene aspecto, textura y características nutricionales. Por lo general, Suele ofrecer la mejor calidad debido a la integridad estructural preservada, evitando el colapso poroso al finalizar el proceso [61].

El secado convierte directamente el hielo en vapor, resultando en una sustancia estable y sin cambios tras la reconstitución, influenciado por el método de empaque y almacenamiento. Las ventajas incluyen la reducción de la degradación de componentes sensibles al calor, la dosificación y control de humedad, así como la rápida reconstitución. Sin embargo, su implementación conlleva costos más elevados de inversión, operación y mantenimiento, además de requerir personal especializado debido a la complejidad del proceso [62].

6.2. Revisión histórica

El secado en frío tiene sus raíces desde la antigüedad, siendo practicado por los Incas alrededor del 1250 a.C. en Machu Picchu. Esta técnica fue utilizada por otros grupos sudamericanos, monjes budistas y vikingos para preservar alimentos como papas, tofu y pescado. A partir del siglo XX, se aplicó en la producción de plasma y penicilina durante la Segunda Guerra Mundial, y en la fabricación de café liofilizado, desarrollando equipos especializados llamados liofilizadores. El café liofilizado fue introducido comercialmente por Nestlé en Suiza, y más tarde por Taster's Choice Coffee, desarrollado por James Mercer en San Francisco en la década de 1970, generando múltiples patentes relacionadas con el proceso [63].

6.3. Secado en frío de alimentos

Los alimentos naturalmente pueden contener agua en porcentajes entre 80% y 95%, esto incluye agua libre y agua ligada a la estructura, por lo que la liofilización se convierte en un proceso complejo. Este requiere subprocesos para preservar la integridad de los alimentos, que incluyen la congelación, la sublimación y la desorción para alcanzar la humedad final deseada. Se distinguen seis características que afectan la calidad del producto y los costos del proceso: el cambio del agua a hielo, la transición de hielo a vapor, la desorción de moléculas, la obtención de bajas presiones, la sublimación del vapor y la remoción de la capa de hielo. Durante la congelación, se busca limitar los cambios químicos y microbiológicos, y durante la sublimación se mantiene una temperatura constante para favorecer el proceso, junto con la remoción constante de vapor y un diferencial de presión adecuado. En el caso de la desorción o post-secado que ocurre a menor presión, influye el resultado ya que la humedad final del producto determina su estabilidad y depende de factores como la composición o estructura del alimento, y las condiciones de congelación; debido a lo cual es difícil determinar el inicio y fin de cada una de las fases del secado en frío, ya que pueden ocurrir simultáneamente dependiendo de las condiciones de secado, y haciendo del secado en frío un proceso complejo [64].

En el secado en frío el proceso seguirá el camino desde A hasta B, como se muestra en la figura 9, en que la presión y temperatura óptima dependerá del alimento; inicialmente al disminuir la temperatura pasará de tener humedad a solidificarse, luego disminuye la presión de vapor más allá del punto T (presión y temperatura a la que las fases líquida, sólida y gaseosa coexisten), y

finalmente al aplicar calor a la misma presión ocurrirá la sublimación y el hielo se convertirá en vapor [65].

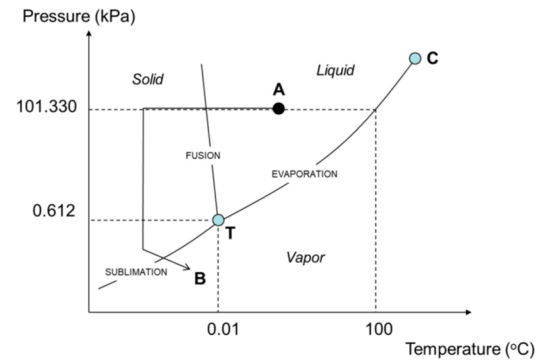


Figura 9. Diagrama de fases del agua

6.4. Secado en frío de café

A pesar de que la industria del café tiene una magnitud importante en la economía global, los estudios respecto al proceso de secado, así como del proceso del café en general, son aun considerablemente limitados. El objetivo principal del secado en granos de café es la reducción de la humedad en este; y al ser este uno de los principales factores en el impacto de la calidad final del café, resulta importante estudiar y conocer la influencia de distintos métodos de secado en la calidad final. Métodos más modernos como el secado en frío (freeze drying), el secado por aspersion (spray drying), o la liofilización por aspersion (spray freeze drying) han mostrado que distintos métodos de secado afectan la calidad final en cuanto a características como aromas, sustancias volátiles, solubilidad, morfología, o color respecto a métodos tradicionales o mecánicos [66].

Entre los distintos métodos de secado el secado en frío (FD) es reconocido por resultar aumentar la temperatura hasta alcanzar el contenido de humedad esperado en el grano. Sin embargo, existe la desventaja de que la energía requerida para el proceso es considerablemente mayor que en otros métodos de secado en que el secado primario abarca aproximadamente el 45% de la energía requerida en el FD. Debido a esto el problema de la optimización energética del FD ha sido estudiado exclusivamente, con el fin de determinar las temperaturas y presiones óptimas; al monitorear el café durante cada uno de los pasos, y al controlar los sistemas y equipos utilizados para evitar las pérdidas energéticas en la medida de lo posible. Los modelos matemáticos es en este caso una herramienta útil para modelar el comportamiento de la influencia de los parámetros variables de temperatura y presión sobre el café y para los controles de estos parámetros en los

equipos utilizados, para ello se determinan los parámetros del modelo y se realizan las validaciones del modelo a través de la comparación a condiciones experimentales [67].

A pesar de que la industria del café tiene una magnitud importante en la economía global, los estudios respecto al proceso de secado, así como del proceso del café en general, son aun considerablemente limitados. El objetivo principal del secado en granos de café es la reducción de la humedad en este; y al ser este uno de los principales factores en el impacto de la calidad final del café, resulta importante estudiar y conocer la influencia de distintos métodos de secado en la calidad final. Métodos más modernos como el secado en frío (freeze drying), el secado por aspersión (spray drying), o la liofilización por aspersión (spray freeze drying) han mostrado que distintos métodos de secado afectan la calidad final en cuanto a características como aromas, sustancias volátiles, solubilidad, morfología, o color respecto a métodos tradicionales o mecánicos [66].

6.5. Calidad del café

La producción en la industria del café se ha desarrollado y expandido ampliamente para mejorar la calidad del producto y lograr la aceptación del consumidor. En el café soluble instantáneo se evalúan para la calidad el color del producto final, el precio por volumen, y la fineza del polvo de café soluble; también se consideran el aroma, y finalmente el sabor, que será el aspecto más importante al seleccionar un café determinado según el uso institucional que se le dará. Variaciones en la congelación mostraron una retención de componentes volátiles ligeramente menor para temperaturas de congelación con incrementos graduales, lo que puede indicar la pérdida de estos componentes pérdidas previo a alcanzar la temperatura final de congelación; los cambio en presión mostraron mayor pérdida para mayores presiones [68].

La implementación del secado en frío también ha sido explorada para el estudio de la calidad del café entre la postcosecha y el tueste, comparando el FD con secado tradicional o el resoplado. Los métodos usuales de tratamiento postcosecha incluyen el procesamiento en húmedo, en seco, o la fermentación, así como el tueste y el almacenamiento; sin embargo, el FD resultó como el método más efectivo en conservar la microestructura de los granos [69].

7. Conclusiones

- El secado solar es una de las prácticas tradicionales mayormente utilizadas por los productores y su eficiencia depende de la radiación emitida por el sol.
- Existen distintas variables que pueden mejorar la eficiencia del secado del café, como la densidad de carga, la superficie de secado, las temperaturas de secado, la inclinación de la superficie y flujo del aire que rodea al grano.
- En el secado solar es necesario agitar manualmente el café para evitar formación de hongos y contaminación.
- El aumento de temperatura por encima de los 40°C en secadoras mecánicas está asociado a una disminución en la calidad final del grano.
- Un aumento en el flujo del aire de secadoras de capa estática tiene una correlación negativa con la calidad sensorial del café despulpado.
- Los silo-secadores son alternativas viables para complementar el secado solar tradicional al disminuir gradualmente el contenido de humedad del grano en sus cámaras de secado.
- El secado en lecho fluidizado es capaz de conservar las características organolépticas del café y logra una buena uniformidad en el contenido de humedad final del grano.
- El secado en frío ha sido un método aplicado históricamente y optimizado posteriormente para la conservación de alimentos; especialmente en la industria del café, en que se ha estudiado la optimización del proceso para la reducción energética y mejorar la calidad final del café.
- Mediante la liofilización se logra preservar la estructura del café, manteniendo las características organolépticas como sabores y aromas, logrando conservar características asociadas a la calidad final; sin embargo, representa costos adicionales de operación y el entrenamiento de personal capacitado debido a la complejidad del proceso, para lo que se ha buscado la implementación de modelos matemáticos con el fin de mejorar el proceso.
- Aunque el secado en frío es un método para el que se ha desarrollado investigación, esta se centra en la industria del café soluble instantáneo, por lo que existe un amplio margen de aplicación en el café de

especialidad; principalmente en la influencia sobre los procesos y las distintas variedades de café, relacionados a la cosecha y postcosecha en la calidad del producto final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al GICCAFÉ, a la Universidad Tecnológica de Panamá y al SENACYT ya que la elaboración de este artículo es parte de la revisión del proyecto APY-NI-2023A-59 “Evaluación del efecto de métodos alternos de secado sobre las cualidades sensoriales de café arábigo”.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Autor	Contribución	Porcentaje
QM	Secado mecanizado, traducción, conclusiones	20%
OC	Introducción, palabras clave, Secado solar, conclusiones	20%
CC	Resumen, secado en frío, conclusiones	20%
AS	Estructura, metodología, redacción, conclusiones, edición	20%
JG	Revisión, edición, investigación	10%
JS	Revisión	5%
IM	Revisión	5%

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

[1] J. Morris, “Coffee: A Global History,” 2019.

[2] Statista, “Coffee - Worldwide,” Market Insights. Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/outlook/cmo/hot-drinks/coffee/worldwide>

[3] P. Poltronieri and F. Rossi, “Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance,” *Challenges*, vol. 7, no. 2, p. 19, Oct. 2016, doi: 10.3390/challe7020019.

[4] F. M. Damatta, J. D. Cochicho Ramalho, F. M. Damatta, and J. D. C. Ramalho, “Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review,” 2006.

[5] F. Bastian *et al.*, “From plantation to cup: Changes in bioactive compounds during coffee processing,” *Foods*, vol. 10, no. 11. MDPI, Nov. 01, 2021. doi: 10.3390/foods10112827.

[6] M. A. Karim, F. Wijayanti, and A. Sudaryanto, “Comparative studies of coffee processing methods for decision making in appropriate technology implementation,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jun. 2019. doi: 10.1063/1.5112399.

[7] G. A. Collazos-Escobar, N. Gutiérrez-Guzmán, H. A. Váquiro-Herrera, and C. M. Amorocho-Cruz, “Moisture dynamic sorption isotherms and thermodynamic properties of parchment specialty coffee (*Coffea arabica* L.),” *Coffee Sci*, vol. 15, no. 1, 2020, doi: 10.25186/v15i1.1684.

[8] X. Wang *et al.*, “Review on factors affecting coffee volatiles: from seed to cup,” *J Sci Food Agric*, vol. 102, no. 4, pp. 1341–1352, Mar. 2022, doi: 10.1002/jsfa.11647.

[9] J. Srikiatden and J. S. Roberts, “Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements,” *Int J Food Prop*, vol. 10, no. 4, pp. 739–777, Oct. 2007, doi: 10.1080/10942910601161672.

[10] K. Burmester and R. Eggers, “Heat and mass transfer during the coffee drying process,” *J Food Eng*, vol. 99, no. 4, pp. 430–436, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.12.021.

[11] M. A. Sfredo, J. R. D. Finzer, and J. R. Limaverde, “Heat and mass transfer in coffee fruits drying,” *J Food Eng*, vol. 70, no. 1, pp. 15–25, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.09.008.

[12] Flavio Meira Borem and Ednilton Tavares de Andrade, “Processing and Drying of Coffee,” in *Drying and Roasting of Cocoa and Coffee*, Ching Lik Hii and Flavio Meira Borem, Eds., CRC Press, 2020.

[13] P. C. Afonso, P. C. Corrêa, F. A. C. Pinto, and C. P. Sampaio, “Shrinkage Evaluation of Five Different Varieties of Coffee Berries during the Drying

- Process,” *Biosyst Eng*, vol. 86, no. 4, pp. 481–485, 2003, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2003.08.012.
- [14] T. P. Labuza and C. R. Hyman, “Moisture migration and control in multi-domain foods.”
- [15] P. R. A. B. Toledo, L. Pezza, H. R. Pezza, and A. T. Toci, “Relationship Between the Different Aspects Related to Coffee Quality and Their Volatile Compounds,” *Compr Rev Food Sci Food Saf*, vol. 15, no. 4, pp. 705–719, Jul. 2016, doi: 10.1111/1541-4337.12205.
- [16] E. B. Estrada-Bahena *et al.*, “Influence of water activity on physical properties, fungal growth, and ochratoxin A production in dry cherries and green-coffee beans,” *J Food Process Preserv*, vol. 46, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.1111/jfpp.16226.
- [17] Mikru Tesfa, “Review on Post-Harvest Processing Operations Affecting Coffee (*Coffea Arabica* L.) Quality in Ethiopia,” *Journal of Environment and Earth Science*, Dec. 2019, doi: 10.7176/JEES/9-12-04.
- [18] D. Jain and G. N. Tiwari, “Thermal aspects of open sun drying of various crops,” 2003. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/energy
- [19] M. Haile and W. Hee Kang, “The Harvest and Post-Harvest Management Practices’ Impact on Coffee Quality,” in *Coffee - Production and Research*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.89224.
- [20] R. J. Clarke, “Green Coffee Processing,” in *Coffee*, Boston, MA: Springer US, 1985, pp. 230–250. doi: 10.1007/978-1-4615-6657-1_10.
- [21] M. A. Karim, F. Wijayanti, and A. Sudaryanto, “Comparative studies of coffee processing methods for decision making in appropriate technology implementation,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jun. 2019. doi: 10.1063/1.5112399.
- [22] J. P. J. Gomes, A. P. S. Ponzio, and A. S. de Oliveira, “Viability of a terrace covered with porous concrete paving blocks for coffee bean drying,” *Revista Agrogeoambiental*, vol. 12, no. 4, Mar. 2021, doi: 10.18406/2316-1817v12n420201523.
- [23] K. Freedman, “A Comparison of Four Solar Drying Methods on Natural Process Coffee in El Paraíso, Honduras.”
- [24] G. V Barbosa-Cánovas, R. W. Hartel, M. Peleg, and S. Rahman, *Quality Determinants In Coffee Production*. in Food Engineering Series. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-54437-9.
- [25] C. H. J. Brando, “Harvesting and Green Coffee Processing,” in *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*, Wiley, 2004, pp. 604–715. doi: 10.1002/9783527619627.ch24.
- [26] C. E. Oliveros *et al.*, “Secado solar y secado mecánico del café,” *En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*, vol. 3, pp. 49–80, 2013, doi: 10.38141/cenbook-0026_29.
- [27] K. Velmourougane, R. Bhat, and T. N. Gopinandhan, “Impact of Drying Surface and Raking Frequencies on Mold Incidence, Ochratoxin A Contamination, and Cup Quality During Preparation of Arabica and Robusta Cherries at the Farm Level,” *Foodborne Pathog Dis*, vol. 7, no. 11, pp. 1435–1440, Nov. 2010, doi: 10.1089/fpd.2010.0575.
- [28] S. Prasertsan and P. Saen-saby, “HEAT PUMP DRYING OF AGRICULTURAL MATERIALS,” *Drying Technology*, vol. 16, no. 1–2, pp. 235–250, Jan. 1998, doi: 10.1080/07373939808917401.
- [29] B. T. Ali Mohammed, “Impact of Sun Drying Methods and Layer Thickness on the Quality of Highland Arabica Coffee Varieties at Limmu, Southwestern Ethiopia,” *Journal of Horticulture*, vol. 01, no. 03, 2014, doi: 10.4172/2376-0354.1000117.
- [30] I. A. Kouadio, L. B. Koffi, J. G. Nemlin, and M. B. Dosso, “Effect of Robusta (*Coffea canephora* P.) coffee cherries quantity put out for sun drying on contamination by fungi and Ochratoxin A (OTA) under tropical humid zone (Côte d’Ivoire),” *Food and Chemical Toxicology*, vol. 50, no. 6. pp. 1969–1979, Jun. 2012. doi: 10.1016/j.fct.2012.03.042.
- [31] J. Quintanar Olguin and R. Roa Durán, “Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero,” *Rev Mex De Cienc Agric*, vol. 8, no. 2, pp. 321–331, Aug. 2017, doi: 10.29312/remexca.v8i2.53.
- [32] V. C. Siqueira *et al.*, “DRYING KINETICS OF PROCESSED NATURAL COFFEE WITH HIGH MOISTURE CONTENT CINÉTICA DE SECAGEM

- DE CAFÉ NATURAL BENEFICIADO COM ALTO TEOR DE ÁGUA.”
- [33] M. A. Scariot, G. Tiburski, F. W. Reichert Júnior, L. L. Radünz, and M. R. R. Meneguzzo, “Teor de água na colheita e temperatura de secagem sobre a qualidade de sementes de feijão,” *Pesqui Agropecu Trop*, vol. 47, no. 1, pp. 93–101, Jan. 2017, doi: 10.1590/1983-40632016v4743135.
- [34] J. Fan, T. J. Siebenmorgen, B. P. Marks, and T. J. Siebenmorgen, “EFFECTS OF VARIETY AND HARVEST MOISTURE CONTENT ON EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENTS OF RICE,” 2000.
- [35] A. Torok, T. Mizik, and A. Jambor, “International Journal of Economics and Financial Issues The Competitiveness of Global Coffee Trade,” *International Journal of Economics and Financial Issues*, vol. 8, no. 5, pp. 1–6, 2018, [Online]. Available: <http://www.econjournals.com>
- [36] M. Bento, P. De Camargo, and M. B. P. Camargo, “The impact of climatic variability and climate AGROMETEOROLOGIA THE IMPACT OF CLIMATIC VARIABILITY AND CLIMATE CHANGE ON ARABIC COFFEE CROP IN BRAZIL (1) RESUMO IMPACTO DA VARIABILIDADE E DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO DE CAFÉ ARÁBICA NO BRASIL,” 2010.
- [37] J. Kath *et al.*, “Not so robust: Robusta coffee production is highly sensitive to temperature,” *Glob Chang Biol*, vol. 26, no. 6, pp. 3677–3688, Jun. 2020, doi: 10.1111/gcb.15097.
- [38] G. Técnica, G. Inés, and P. Quintero, “LA HUMEDAD CONTROLADA DEL GRANO PRESERVA LA CALIDAD DEL CAFÉ,” 2006.
- [39] V. H. Ramírez B *et al.*, “FLORACIÓN DEL CAFÉ EN COLOMBIA Y SU RELACIÓN CON LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA, TÉRMICA Y DE BRILLO SOLAR,” 2010.
- [40] F. Kulapichitr, C. Borompichaichartkul, I. Suppavorasatit, and K. R. Cadwallader, “Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee,” *Food Chem*, vol. 291, pp. 49–58, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.152.
- [41] C. E. Oliveros *et al.*, “Secado solar y secado mecánico del café”, doi: 10.38141/cenbook-0026_29.
- [42] Ida Bagus Alit and I Gede Bawa Susana, “Rotary dryer in a study based on participatory principles for smallholder scale drying,” *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, vol. 12, no. 2, pp. 072–077, Aug. 2022, doi: 10.30574/gjeta.2022.12.2.0139.
- [43] W. Ukers, *All About Coffee*.
- [44] N. Malekjani, F. P. Talemy, R. Zolqadri, and S. M. Jafari, “Roller/drum dryers and rotary dryers,” in *Drying Technology in Food Processing*, Elsevier, 2023, pp. 47–66. doi: 10.1016/B978-0-12-819895-7.00014-6.
- [45] P. C. Coradi *et al.*, “Development and validation of a heated drying air diffusion system to optimize rotary dryers and final coffee quality,” *PLoS One*, vol. 16, no. 6 June, Jun. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0251312.
- [46] “Secadora rotativa para café SG 4 Penagos.”
- [47] T. N. Sandeep, B. B. Channabasamma, T. N. Gopinandhan, and J. S. Nagaraja, “The effect of drying temperature on cup quality of coffee subjected to mechanical drying,” *Journal of Plantation Crops*, vol. 49, no. 1, pp. 35–41, May 2021, doi: 10.25081/jpc.2021.v49.i1.7059.
- [48] T. N. Sandeep, B. B. Channabasamma, T. N. Gopinandhan, and J. S. Nagaraja, “The effect of drying temperature on cup quality of coffee subjected to mechanical drying,” *Journal of Plantation Crops*, vol. 49, no. 1, pp. 35–41, May 2021, doi: 10.25081/jpc.2021.v49.i1.7059.
- [49] C. Henrique, R. Reinato, ; Flávio, and M. Borém, “INTERFERÊNCIA DA SECAGEM NATURAL E ARTIFICIAL NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E ANÁLISE SENSORIAL DO CAFÉ DESPOLDADO EFFECT OF NATURAL AND ARTIFICIAL DRYING ON CHEMICAL COMPOSITION AND SENSORIAL ANALYSES OF PULPED COFFEE.”
- [50] F. Meira Borém, P. Carteri Coradi, R. Saath, and J. Almir Oliveira, “Quality of natural and washed coffee after drying on ground and with high temperature.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/260773587>
- [51] A. Parra-Coronado, G. Roa-Mejía, and C. E. Oliveros-Tascón, “SECAFÉ Parte I: Modelamiento y

- simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino.” [Online]. Available: <http://www.agriambi.com.br>
- [52] Jhony Mauricio Gutiérrez Flórez and Henry Copete López, “Hacia la mejora del secado mecánico del café en Colombia”, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234316007>
- [53] A. Parra-Coronado, G. Roa-Mejía, and C. E. Oliveros-Tascón, “SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino.” [Online]. Available: <http://www.agriambi.com.br>
- [54] F. M. Borém *et al.*, “Qualidade do café submetido a diferentes temperaturas QUALIDADE DO CAFÉ SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS, FLUXOS DE AR E PERÍODOS DE PRÉ-SECAGEM QUALITY OF COFFEE SUBMITTED TO DIFFERENT TEMPERATURES, AIR FLOW AND PRE-DRYING PERIOD,” 2006.
- [55] G. E. Alves, F. M. Borém, E. P. Isquierdo, V. C. Siqueira, M. Â. Cirillo, and A. C. F. Pinto, “Qualidade fisiológica e sensorial do café arábica submetido a diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem,” *Acta Sci Agron*, vol. 39, no. 2, pp. 225–233, 2017, doi: 10.4025/actasciagron.v39i2.31065.
- [56] C. V. Fecha *et al.*, “INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO SECADO DE CAFÉ PERGAMINO CON TAMBOR ROTATORIO USANDO DESHUMIDIFICACION CON BOMBA DE CALOR Y CON COMPRESOR TIPO INVERTER INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO FACULTAD DE INGENIERÍAS INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA MEDELLÍN-COLOMBIA 2017.”
- [57] H. F. Cano Suárez, H. J. Ciro Velásquez, and J. C. Arango Tobón, “Efecto del secado y presecado mecánico previo al almacenamiento en la calidad del grano de café (*Coffea arabica* L.),” *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 21, no. 2, Dec. 2018, doi: 10.31910/rudca.v21.n2.2018.1068.
- [58] L. G. Gibilaro, *Fluidization dynamics*. 2001.
- [59] A. Casp Vanaclocha and J. Abril Requena, “Procesos de conservación de alimentos,” *Mundi-Prensa*, 1999.
- [60] E. M. López Fontal, “Secado de café en lecho fluidizado”.
- [61] J. S. Ramírez Navas, “Liofilización de alimentos,” Cali, 2006.
- [62] P. Haseley and G.-W. Oetjen, “Freeze-Drying,” Weinheim, 2018.
- [63] D. Varshney and M. Singh, “History of Lyophilization,” in *Lyophilized Biologics and Vaccines*, Springer New York, 2015, pp. 3–10. doi: 10.1007/978-1-4939-2383-0_1.
- [64] D. Nowak and E. Jakubczyk, “The freeze-drying of foods⇔the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials,” *Foods*, vol. 9, no. 10. MDPI AG, Oct. 18, 2020. doi: 10.3390/foods9101488.
- [65] S. Bhatta, T. S. Janezic, and C. Ratti, “Freeze-drying of plant-based foods,” *Foods*, vol. 9, no. 1. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. doi: 10.3390/foods9010087.
- [66] P. Siagian, E. Y. Setyawan, T. Gultom, F. H. Napitupulu, and H. Ambarita, “A field survey on coffee beans drying methods of Indonesian small holder farmers,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Sep. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/237/1/012037.
- [67] D. Fissore, R. Pisano, and A. A. Barresi, “Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process,” *J Food Eng*, vol. 123, pp. 179–187, 2014, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.09.018.
- [68] E. E. Petersen, J. Lorentzen, and J. Flink’, “Influence of Freeze-Drying Parameters on the Retention of Flavor Compounds of Coffee,” 1973.
- [69] W. Dong, Y. Kitamura, M. Kokawa, T. Suzuki, and N. Zhao, “Microstructural Modication of Green Coffee Beans through Drying and Pung,” 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-3134092/v1.