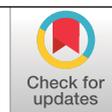


INOCUIDAD DEL CAFÉ DURANTE LA INTERRUPCIÓN DEL SECADO MECÁNICO

Jenny Paola Pabón Usaquéñ *, Valentina Osorio Pérez **, Claudia Patricia Gallego Agudelo *

Pabón, J., Osorio, V., & Gallego, C. P. (2023). Inocuidad del café durante la interrupción del secado mecánico. *Revista Cenicafé*, 74(2), e74205. <https://doi.org/10.38141/10778/74205>



En el procesamiento del fruto de café, en la etapa de secado se disminuye el contenido de agua y de esta manera se afecta el crecimiento de hongos toxigénicos. Para evaluar la inocuidad del café cuando se realizan interrupciones durante el secado mecánico, se aplicó un diseño factorial $2 \times 4 + 1$, con dos tiempos de secado inicial (6 y 12 horas), con cuatro tiempos de interrupción (12, 24, 36 y 48 horas) y un testigo con secado mecánico sin interrupción. Se cuantificaron las unidades formadoras de colonias (UFC) de hongos y levaduras, contenido de humedad y actividad del agua del café húmedo antes y después de la interrupción y al finalizar el secado. Se determinó la concentración de ocratoxina A y los compuestos químicos con la técnica NIRS en los granos de café de cada tratamiento. Según el ANAVA, el contenido de humedad del café con tiempo de secado inicial de 12 horas fue menor significativamente al secado de 6 horas con valores de 42,29% y 47,49%, respectivamente. El contenido de hongos y levaduras fue mayor en el café húmedo sometido a interrupción ($4,14 \times 10^6$ UFC/g) que en el café pergamino seco ($8,19 \times 10^3$ UFC/g). Los valores de ocratoxina A no presentaron efecto de tratamientos.

Palabras clave: Hongos, levaduras, secado mecánico, ocratoxina A, actividad de agua, café verde, Cenicafé, Colombia.

ASSESSING THE SAFETY OF COFFEE DURING MECHANICAL DRYING INTERRUPTIONS

In coffee fruit processing, the drying stage plays a pivotal role in reducing water content and mitigating the growth of toxigenic fungi. This study aims to evaluate the safety of coffee when interruptions occur during mechanical drying. This study used a $2 \times 4 + 1$ factorial design, incorporating two initial drying times (6 and 12 hours), four interruption intervals (12, 24, 36 and 48 hours) and a control group with continuous mechanical drying. Key parameters such as Colony Forming Units (CFU) of molds and yeasts, moisture content and water activity in wet coffee before and after the interruptions, as well as after the completion of drying were quantified. The concentration of ochratoxin A and the chemical compounds were also analyzed using NIRS in coffee beans from each treatment. According to the ANOVA, coffee subjected to an initial drying time of 12 hours exhibited distinct moisture content (42.29%) compared to the 6-hour drying (47.49%). Wet coffee exposed to interruptions displayed higher levels of fungi and yeasts (4.14×10^6 CFU/g) compared to dry parchment coffee (8.19×10^3 CFU/g). However, ochratoxin A levels remained consistent across treatments.

Keywords: fungi, yeast and molds, mechanical drying, ochratoxin A, water activity, green coffee, Cenicafé, Colombia.

*Asistente de Investigación. Disciplina de Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-1576-2297> y <https://orcid.org/0000-0002-1532-8055>, respectivamente.

** Investigador Científico I. Disciplina de Calidad, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-1166-0165>



La inocuidad de los alimentos puede definirse como el conjunto de condiciones necesarias durante la producción, almacenamiento, distribución y preparación para asegurar que una vez ingeridos, no representen un riesgo para la salud (Díaz & Sánchez, 2023). El café es una bebida de consumo humano y por lo tanto, la inocuidad del producto debe garantizarse en toda su cadena de procesamiento (Lachenmeier et al., 2021). Los hongos y levaduras son microorganismos que indican condiciones inapropiadas de almacenamiento y de manejo, estos microorganismos se encuentran ampliamente distribuidos en el ambiente y se dispersan fácilmente por el aire y por el polvo (Erkmen, 2022).

La población de hongos presentes durante la poscosecha y el almacenamiento, afecta negativamente a la calidad del café, especialmente en lo que se refiere al deterioro, los sabores desagradables y la producción de micotoxinas (Waters et al., 2017). Así mismo, la temperatura y la actividad del agua (a_w) desempeñan un papel importante en la biosíntesis de hongos toxigénicos que producen ocratoxina A (OTA) (Oliveira et al., 2019). Además de las aplicaciones industriales y alimentarias, los hongos también se utilizan en medicina para la producción de una gran cantidad de compuestos, como los antibióticos (Corbu et al., 2023); sin embargo, los hongos han sido designados como una de las principales causas de daños durante el almacenamiento de granos y sus metabolitos pueden poner en riesgo la salud de los consumidores.

La ocratoxina A (OTA) es un metabolito secundario, producido por hongos filamentosos como los de las especies *Aspergillus* y *Penicillium* (Yazdanfar et al., 2022). Esta micotoxina está clasificada como posible compuesto cancerígeno para humanos (Grupo 2B) (Mahmudiono et al., 2023). La ocratoxina A fue descrita por primera vez en

1965 producida por *Aspergillus ochraceus* en granos de sorgo enmohecido (Van der Merwe et al., 1965). Los granos de café pueden ser contaminados por hongos que, además de alterar la calidad del café, pueden presentar un grave riesgo de contaminación por OTA, comprometiendo la seguridad del producto (Batista et al., 2009). Levi et al. (1974) encontraron que los granos de café verde con presencia de *Aspergillus ochraceus* tenían niveles detectables de ocratoxina A y, en 1986, se reportó la presencia de ocratoxina en café tostado (Pardo et al., 2005). Para la producción de ocratoxinas, los valores de actividad de agua óptimos se encuentran en rangos de 0,87 a 0,90, dependiendo de la temperatura de almacenamiento (Gopinandhan et al., 2008); si en los granos hay altos contenidos de humedad que equivalen a elevados valores de actividad de agua ($a_w \geq 0,95$), prosperan los hongos hidrofílicos de rápido crecimiento, así como las levaduras, que compiten por el sustrato y reprimen el crecimiento de los hongos xerófilos productores de ocratoxina A, como los *Aspergillus* sp. (Mannaa & Kim, 2017).

Posterior a las etapas de eliminación de la cáscara y del mucílago, con sus respectivas actividades de clasificación, se obtiene café pergamino lavado con una humedad en base húmeda de alrededor del 52% al 53%, condición que es propicia para el crecimiento de microorganismos, por lo cual se hace necesario reducir la actividad de agua de los granos y asegurar la inocuidad del café, por medio de tecnologías como el secado (Parra et al., 2017). Para el café pergamino seco se ha determinado un nivel de humedad estable entre el 10% y el 12%, expresada en base húmeda (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2006).

La etapa de secado puede realizarse por dos vías: natural y mecánico. Por la vía natural

se aprovechan las propiedades del aire y la energía solar para reducir la humedad de los granos de café. En Colombia el secado natural ha sido utilizado tradicionalmente por fincas de baja producción, mientras que fincas de mediano y gran formato han empleado con mayor frecuencia el secado mecánico. En este tipo de secado, se emplea una fuente externa de calentamiento para aumentar la temperatura del aire, que es impulsado por ventiladores. El secado mecánico puede dividirse en tres tipos: el primero de capa estática, en el cual el café se deposita en una cámara de secado y el aire caliente cruza a través de las capas de café; el segundo, de capa dinámica, donde el café se encuentra en movimiento y el aire caliente se introduce por un eje central; el tercero es de flujos concurrentes, es el menos utilizado para el secado de café, en el que la masa se deposita en cangilones, permitiendo la caída de los granos de café en un sistema de secado vertical y el aire caliente circula en contracorriente (Oliveros et al., 2013).

Para el café procesado vía seca (café natural) los períodos de interrupción durante el secado pueden ayudar a mejorar la calidad final del producto y reducir el consumo de energía. En este aspecto, Isquierdo et al. (2012), encontraron que la combinación del secado de café con menores contenidos de humedad y mayores períodos de interrupción, así como la combinación de mayores contenidos de humedad y períodos más cortos de interrupción dieron como resultado los valores más bajos de lixiviación del potasio y la calidad de la bebida mejoró gradualmente a medida que aumentaba la duración del período de interrupción.

El sistema de secado estático, es el más común y empleado en Colombia para lo cual existen de forma comercial silos de diferentes capacidades. Además, se han establecido los parámetros técnicos para su adecuado

funcionamiento, como son: el flujo de aire de $100 \text{ m}^3\text{min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ de café pergamino seco (cps), temperatura no mayor a 55°C y la altura de la capa de café de 40 cm (Parra et al., 2017). Sin embargo, la práctica de apagar el silo interrumpiendo el proceso de secado es empleada por los caficultores debido principalmente a la logística de las fincas durante los períodos de procesamiento y a la necesidad que se presenta cuando debe completarse la cantidad de café para utilizar el silo. En un estudio previo, Pabón & Osorio (2022), determinaron que cuando se realizan prácticas de interrupción del secado mecánico, es más probable obtener defectos sensoriales que afectan la calidad de la bebida; sin embargo, se desconocía el efecto de interrumpir el secado y almacenar el café húmedo en la inocuidad y la producción de la ocratoxina A en el café. Por consiguiente, este trabajo tuvo como objetivo estimar las unidades formadoras de colonia por gramo (UFC/g) de hongos y levaduras, así como la concentración de ocratoxina A ($\mu\text{g kg}^{-1}$), en los granos de café verde obtenidos cuando el café se somete a interrupciones durante el secado mecánico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) ($5^\circ 00'$ latitud Norte, $75^\circ 36'$ longitud Oeste y 1.310 m de altitud, con temperatura media de $21,2^\circ\text{C}$, temperatura máxima de $27,9^\circ\text{C}$, temperatura mínima de 17°C y humedad relativa del 82,3% (Manizales, Caldas). El procesamiento de los frutos se realizó en la Unidad de Beneficio de Semilla de Cenicafé, durante la cosecha principal y secundaria del año 2020 y 2021, respectivamente. En la Tabla 1 se describen los tratamientos evaluados, que consistieron en dos tiempos de secado inicial, cuatro tiempos de interrupción y un testigo absoluto (sin interrupción). La unidad experimental estuvo

conformada por 162 kg de café lavado de variedad Castillo® General. Para obtener el café lavado se realizó la clasificación manual para descartar frutos pintones e inmaduros, se removió el mucilago por fermentación espontánea definiendo el punto final con el Fermaestro™ y se realizó lavado manual del café utilizando la metodología de los cuatro enjuagues, se tuvieron cinco unidades experimentales por tratamiento.

El efecto de tratamientos se evaluó bajo el modelo para el diseño completamente aleatorio en arreglo factorial 2x4+1 (dos tiempos de secado, cuatro tiempos de interrupción y un testigo absoluto). Cada unidad experimental y de acuerdo con el tratamiento, se procesó en un secador de capa estática con combustión directa, con gas propano como combustible y con un caudal del aire de 100 m³ min⁻¹ cps y se empleó una temperatura del aire de secado de 37°C (±5,0°C). El proceso de interrupción se realizó en las instalaciones del beneficiadero en condiciones ambientales sin controlar, la temperatura promedio fue de 21,4°C (mínimo y máximo de 17,54°C y 29°C, respectivamente) y la humedad relativa fue en promedio de 86,08% (con un valor mínimo de 53,24% y 100% con valor máximo).

El contenido de hongos y levaduras se determinó en el café pergamino húmedo antes y después de los tiempos de interrupción y la concentración de ocratoxina A, se determinó al terminar el secado, estas se consideraron como variables de respuesta, y como variables complementarias se consideraron el contenido de humedad, la actividad de agua del café húmedo antes y después de los tiempos de interrupción y la composición química del café pergamino seco de todos los tratamientos. En la Figura 1 se presenta el esquema general de la toma de muestras y los análisis realizados.

Antes del proceso de secado, al momento de la interrupción y al finalizar el secado, se registró el contenido de humedad del café, utilizando el método de la estufa (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2005) y los valores de actividad de agua empleando un medidor de actividad de agua con control de temperatura (Novasina, LabMaster-aw).

Análisis microbiológico. El contenido de hongos y levaduras se determinó para el café pergamino húmedo antes y después de los tiempos de interrupción según cada tratamiento y para el café pergamino seco correspondiente.

Para determinar las unidades formadoras de colonia (UFC/g) de hongos y levaduras se esterilizaron todos los materiales en autoclave, por 15 minutos, a 120°C y 15 psi de presión. La preparación consistió en la adición de agua peptonada al 0,1% a 10,0 g de granos de café almendra provenientes de cada tratamiento. Se agitó la muestra y se realizaron diluciones seriales de esta preparación, desde 10⁻¹ hasta 10⁻³. La inoculación de las muestras se realizó en placas Petrifilm (3M®), que es un sistema de medio de cultivo específico y listo para usar para hongos y levaduras, que contiene nutrientes suplementados con antibióticos, un agente gelificante soluble en agua fría y un indicador que facilita la enumeración de hongos y levaduras. En la placa, las levaduras se caracterizan por ser colonias pequeñas de color verde azulado con bordes definidos y sin núcleo. Los hongos se caracterizan por ser colonias grandes de colores variables, con bordes difusos y núcleos centrales. Las placas se incubaron a una temperatura de 25°C, durante 5,0 días según el protocolo AOAC 997.02 (Andrews & Hammack, 2005).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Tiempo de secado (h)	Tiempo de interrupción (h)	Descripción
T12-12	12	12	Interrupción del secado mecánico a las 12 horas de iniciado el proceso por un período de 12 horas, después reinició hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
T12-24	12	24	Interrupción del secado mecánico por 24 horas a las 12 horas de iniciado el proceso, después reinició el proceso de secado hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
T12-36	12	36	Interrupción del secado mecánico por 36 horas a las 12 horas de iniciado el proceso, después reinició hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
T12-48	12	48	Interrupción del secado mecánico por 48 horas a las 12 horas de iniciado el proceso, después continúa hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
T6-12	6	12	Interrupción del secado mecánico por 12 horas a las seis horas de iniciado el proceso, después se continúa hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
T6-24	6	24	Interrupción del secado mecánico por 24 horas a las seis horas de iniciado el proceso, después continúa hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
T6-36	6	36	Interrupción del secado mecánico por 36 horas a las seis horas de iniciado el proceso, después continúa hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
T6-48	6	48	Interrupción del secado mecánico por 48 horas a las seis horas de iniciado el proceso, después reinició hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.
Testigo	Proceso de secado mecánico sin interrupción hasta que el café alcanzó una humedad entre el 10% y el 12%.		

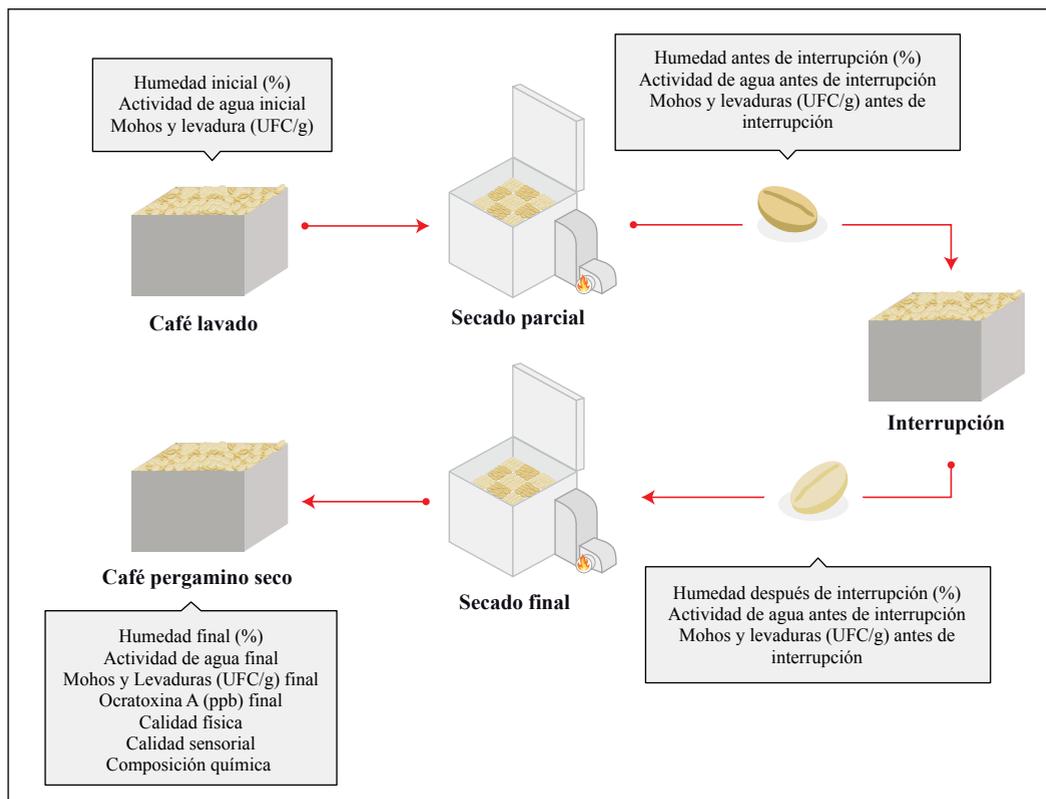


Figura 1. Procedimiento realizado y momento en el cual se toman las muestras para todos los análisis.

Análisis de Ocratoxina A

Se empleó el método fluorescencia de Vicam Ochratest® con columnas de inmunoafinidad, se realizó la extracción a 25 g de café almendra molido con 50 mL de metanol con NaHCO₃ al 3%, se agitó a alta velocidad por 1,0 minuto y se filtró a través de filtros Whatman N°4. Se tomaron 5,0 mL del filtrado y se aforaron con 20 mL de solución salina de buffer de fosfato Tween 20 al 2,0% (PBS). Se filtró nuevamente a través de un filtro de microfibras de vidrio de 1,5 µm dentro de un recipiente limpio. Para realizar la extracción, se tomaron 10 mL del extracto y se pasaron a través de la columna de Ochratest® de inmunoafinidad,

con una velocidad de una a dos gotas por segundo (empleando una jeringa de vidrio para generar presión de vacío controlado); luego, la columna se lavó con 10 mL de PBS/2%Tween-20 con la misma velocidad de flujo y, finalmente, se lavó con agua destilada (10 mL). Posteriormente se eluyó la columna con 1,5 mL de solución eluyente Ochratest® a una velocidad de una gota por segundo. El eluato se recogió en un vial y se llevó al Fluorómetro Vicam (serie 4Ex), previamente calibrado y se leyó la concentración de OTA (ppb) de la muestra.

Composición química. Se realizó mediante el método de espectroscopia de infrarrojo

cercano (NIRS) para estimar los contenidos de cafeína, ácidos clorogénicos totales, lípidos totales, sacarosa y trigonelina presentes en el café verde de las muestras obtenidas (Gómez et al., 2021). Las muestras se analizaron en el rango de longitud de onda de 680–2.500 nm en un instrumento monocromador (NIRS model 6500, NIRSystems, Silver Spring, Maryland, USA).

Análisis de la información. Se determinaron los promedios y variación por tratamiento de las variables de respuesta y complementarias. Se realizó el análisis de varianza bajo un diseño completamente aleatorio. Además, se aplicó la prueba de Dunnett, al 5%, para identificar los tratamientos que tuvieran igual o mayor promedio, con respecto al testigo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Humedad y actividad de agua del café

El proceso de secado del grano es crucial, puesto que permite que el café pergamino disminuya su humedad y de esta forma se evita la contaminación por el crecimiento de hongos. Con el objetivo de monitorear el comportamiento del contenido de humedad durante la aplicación de tratamientos, se estimaron la humedad y la actividad de agua del café antes y después de los tiempos de

interrupción. Con secado inicial de 12 horas el contenido de humedad se redujo a 42,29%, la cual fue significativamente menor a la obtenida cuando el tiempo inicial de secado fue de seis horas (47,49%).

La humedad del café después de los tiempos de interrupción, fue mayor cuando se aplicaron seis horas de secado inicial con valores promedio de 49,45%. Mientras que en los tratamientos en los cuales se empleó un tiempo de secado de 12 horas, la humedad después de los tiempos de interrupción fue en promedio de 44,08%. La humedad de los granos de café aumentó después de los tiempos de interrupción, en 1,96% y 1,79%, cuando se aplicó un secado inicial de seis y 12 horas, respectivamente (Tabla 2).

En cuanto a la duración del proceso de secado (Figura 2), los tratamientos que tardaron más en alcanzar la humedad deseada (10% al 12%) fueron los que tuvieron períodos de interrupción largos (48 h). Mientras que el testigo en el cual no hubo interrupciones tuvo en promedio una duración del secado de 50,2 horas. Al final del proceso, el café de todos los tratamientos independiente del tiempo de interrupción, continuaron con el secado hasta alcanzar una humedad comprendida entre el rango del 10% y el 12%.

Tabla 2. Humedad antes y después de la interrupción, según el tiempo de secado.

Tiempo de secado (h)	Humedad antes de la interrupción (%)	Humedad después de la interrupción (%)	Incremento (%)
6	47,49	49,45	1,96%
12	42,29	44,08	1,79%

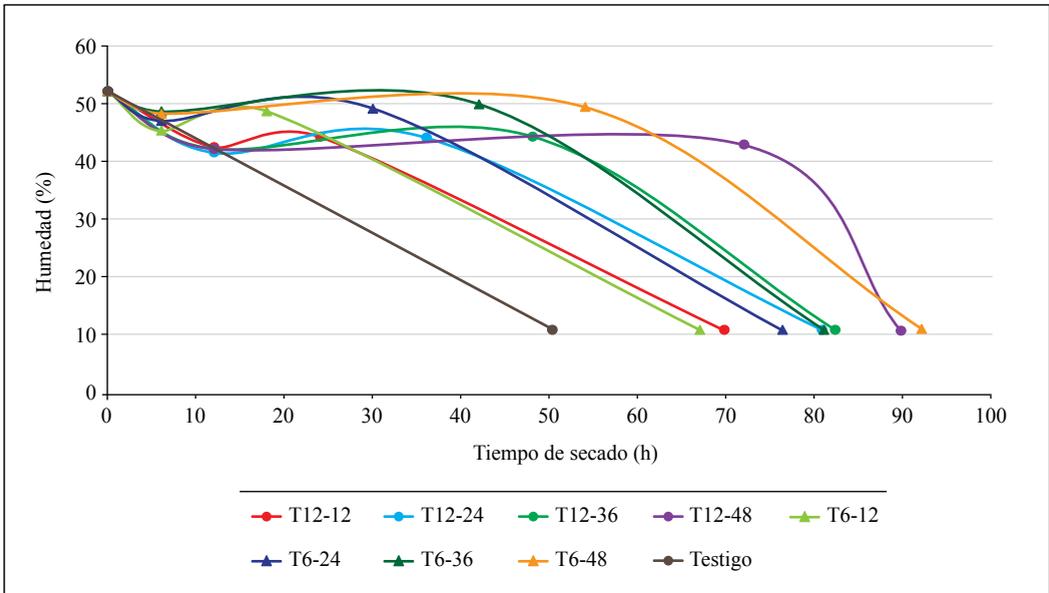


Figura 2. Variación de los contenidos de humedad medidos durante el tiempo de secado para los tratamientos.

Actividad de Agua

La actividad de agua es un parámetro termodinámico que representa la disponibilidad del agua para diferentes reacciones y está relacionada con el tipo de alimento, su composición química y la temperatura (Pardo et al., 2005). El proceso de secado de café que asegura contenidos de humedad comprendidos entre el 10% al 12%, elimina el agua disponible y deja solo el agua ligada, permitiendo que los valores de actividad de agua sean inferiores a 0,62 (Osorio, 2021).

Según el ANAVA no hubo efecto entre tratamientos para los valores de actividad de agua ($P = 0,8834$), es decir, que la actividad de agua fue igual antes de la interrupción, independiente del tiempo de secado inicial, con un promedio de 0,9107 y una desviación estándar de 0,0167. Del mismo modo, después de los tiempos de interrupción, el promedio de

actividad de agua (0,9680) fue independiente de los períodos de interrupción de secado ($P = 0,97296$).

Hongos y levaduras

Se observó que, cuando la humedad de los granos de café fue mayor al 40% y la actividad de agua fue de 0,94, se alcanzaron promedios altos de unidades formadoras de colonia de hongos y levaduras, del orden de 10^6 , que indican contaminación por estos microorganismos (Tabla 3). Del mismo modo, Pabón & Peñuela (2016) reportaron $7,67 \times 10^5$ UFC/g de hongos y levaduras para café húmedo almacenado antes del secado final. Mientras que, los menores valores para esta variable, del orden de 10^3 UFC/g, se encontraron cuando el café se encontraba seco, es decir, con un contenido de humedad entre el 10% y 12%, con un promedio de actividad de agua de 0,60. Cuando se analizó esta variable en el café

Tabla 3. Promedio y desviación estándar de las unidades formadoras de colonia por gramo (UFC/g) de hongos y levaduras estimadas por tratamiento.

Tratamiento	Antes de interrupción			Después de interrupción			Final		
	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.
T12-12	4,75x10 ⁵	2,41x10 ⁵	1,28x10 ⁵	2,15x10 ⁶	1,27x10 ⁶	5,50x10 ⁵	1,30x10 ⁴	5,14x10 ³	0,0
T12-24	4,40x10 ⁵	2,33x10 ⁵	3,40x10 ⁴	8,75x10 ⁶	3,67x10 ⁶	1,16x10 ⁶	1,17x10 ⁴	8,79x10 ³	3,83x10 ³
T12-36	4,30x10 ⁵	2,49x10 ⁵	1,25x10 ⁵	5,60x10 ⁶	3,97 x10 ⁶	8,75x10 ⁵	2,70x10 ⁴	9,34x10 ³	0,0
T12-48	4,60x10 ⁵	3,54x10 ⁵	1,55x10 ⁵	7,40x10 ⁶	5,00x10 ⁶	1,75x10 ⁶	1,44x10 ⁴	9,82x10 ³	5,1x10 ³
T6-12	1,35x10 ⁶	4,50x10 ⁵	1,06x10 ⁵	3,00x10 ⁶	1,18x10 ⁶	5,25x10 ⁵	1,60x10 ⁴	6,72x10 ³	0,0
T6-24	1,03x10 ⁶	5,28x10 ⁵	2,00x10 ⁵	6,80x10 ⁶	3,43x10 ⁶	1,18x10 ⁶	2,55x10 ⁴	8,32x10 ³	0,0
T6-36	6,26x10 ⁵	5,49x10 ⁵	4,98x10 ⁵	6,25x10 ⁶	4,31x10 ⁶	2,55x10 ⁶	2,20x10 ⁴	1,09x10 ⁴	0,0
T6-48	1,48x10 ⁶	9,48x10 ⁵	3,50x10 ⁵	3,22x10 ⁷	1,03x10 ⁷	3,20x10 ⁶	2,25x10 ⁴	1,42x10 ⁴	0,0
Testigo	1,26x10 ⁶	6,47x10 ⁵	7,0x10 ³	-	-	-	1,50x10 ³	5,00x10 ²	0,0

pergamino seco no hubo efecto de tratamientos, según prueba Dunnet al 5% de significancia, es decir que, a pesar de someter el café a períodos de interrupción durante el proceso de secado, cuando el grano de café se encuentra en rangos de humedad comprendidos entre el 10% al 12% se asegura la inocuidad del producto al disminuir las cantidades de microorganismos que pueden afectarla. De forma similar, Maman et al. (2021) no encontraron diferencias en el contenido de hongos de las especies *Aspergillus* y *Penicillium*, en frutos de *Coffea arabica*, en café despulpado, en café lavado y en café pergamino seco, proveniente del Norte de Tailandia, con un contenido de hongos menor en los granos de café secos. Sin embargo, cuando se somete el café lavado a interrupciones de hasta 48 horas, el secado debe realizarse de forma inmediata para evitar la generación de defectos sensoriales, como el terroso, que afectan la calidad sensorial de la bebida (Pabón & Osorio, 2022).

Los daños causados por los hongos en el grano de café reducen la calidad sensorial de la bebida y ponen en peligro la seguridad del producto final. Los estudios microbiológicos han demostrado que los principales géneros de hongos filamentosos que atacan los granos de café son *Aspergillus* spp, *Penicillium* spp y *Fusarium* spp (Hlebová et al., 2022), los cuales están presentes tanto en el campo como durante el almacenamiento (Puerta, 2003). Batista et al. (2009), determinaron que los frutos recogidos del suelo y los retirados por medio de flotación, presentan mayor riesgo de contaminación por hongos que producen ocratoxina A, lo que muestra la importancia de clasificar el café durante todas las actividades relacionadas con el proceso de beneficio y evitar interrupciones durante el proceso de secado. En consecuencia, los frutos de café utilizados en este estudio para la aplicación de los tratamientos, fueron clasificados hidráulicamente previo a su procesamiento,

y seleccionados por estado de madurez asegurando frutos 100% maduros y sanos, lo anterior contribuyó a un menor riesgo de contaminación por hongos. Así mismo, la clasificación hidráulica no genera riesgos en la inocuidad del producto ni aumenta los defectos sensoriales del café (Osorio, 2021).

Ocratoxina A

Según el ANAVA el contenido de ocratoxina A fue estadísticamente igual en todos los tratamientos de secado y tiempos de interrupción probados (P 0,17578). Los valores promedio estuvieron entre 3,8 a 6,9 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Tabla 4). El valor mínimo correspondió al testigo, en el cual el café no se sometió a interrupciones durante el proceso de secado. La norma vigente del contenido de ocratoxina A (EU1370/2022) para café tostado y café soluble contempla valores de hasta 5,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$; teniendo en cuenta que esta micotoxina es termoresistente, se ha demostrado que existe una reducción debido al proceso de tueste, al cual es sometido el café almendra, con porcentajes de reducción de esta micotoxina desde el 69% hasta el 90% (Van der Stegen et al., 2001). Del mismo modo, los contenidos de ocratoxina A en el 100% de las muestras provenientes de frutos maduros de *C. arabica* procesados por vía seca y vía húmeda estuvieron en un rango de 0 a 5,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Batista et al., 2009). Sin embargo, el 76,8% de las muestras obtenidas de café recogido del suelo y de granos clasificados como flotes obtuvieron valores de ocratoxina A entre 5,0 y 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de ocratoxina A (Batista et al., 2009). De la misma forma Gopinandhan et al. (2008) determinaron en 80 muestras de café de la India, que el 74% del café arábigo procesado por vía húmeda obtuvo valores de ocratoxina de 0,2 a 13,5 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Sousa et al. (2019) analizaron el contenido de ocratoxina A de 30 muestras de café provenientes de diferentes zonas del

Brasil, con presencia de hongos de los géneros *Aspergillus*, encontrando que ninguna de las muestras evaluadas sobrepasó el límite de 10 $\mu\text{g kg}^{-1}$, establecido en este país para los granos de café verde. Además, Estrada-Bahena et al. (2022) almacenaron café almendra con diferentes contenidos de actividad de agua a 35°C por 60 días, y estimaron que los aumentos de la ocratoxina A (20,40 a 22,54 $\mu\text{g kg}^{-1}$) estuvieron relacionados con valores de actividad de agua entre 0,628 a 0,743 y con la temperatura de almacenamiento.

Composición química

Como información complementaria se cuantificaron por medio de la técnica NIRS (Gómez et al., 2021) los siguientes compuestos químicos: cafeína (%), trigonelina (%), sacarosa (%), lípidos (%), ácidos clorogénicos totales (%), ácidos grasos: esteárico (%), linoleico (%), oleico (%), araquídico (%) y palmítico (%) (Tabla 5). Ninguna de estas variables

presentó diferencias entre tratamientos ni con el testigo, es decir que, la interrupción del proceso de secado mecánico no tuvo influencia en el contenido de los compuestos químicos evaluados, cuando se realiza el secado con temperaturas controladas y no mayores a 40°C. En contraste, el empleo de altas temperaturas (mayores a 55°C) durante el secado sí tiene influencia en los compuestos lipídicos del café almendra y están relacionados con la calidad sensorial del producto (Coradi et al., 2007; Cano et al., 2018).

Se puede concluir que para mantener la inocuidad del café y evitar el crecimiento de hongos, que contribuyen al crecimiento de micotoxinas como la ocratoxina A, es necesario reducir la humedad del grano a valores del 10% al 12% a través de un proceso de secado continuo. Adicionalmente para mantener la calidad e inocuidad del café lavado, se deben realizar prácticas de clasificación al fruto antes del procesamiento.

Tabla 4. Valores promedio y desviación estándar de la ocratoxina A.

Tratamiento	Promedio ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Desv. Estándar
7T12-12	6,0	2,2
T12-24	6,1	1,8
T12-36	4,5	2,0
T12-48	5,0	1,2
T6-12	6,0	2,6
T6-24	4,2	2,6
T6-36	6,9	1,2
T6-48	4,2	2,2
Testigo	3,8	1,2

Tabla 5. Valores promedio y desviación estándar para los compuestos químicos.

Grupo	Compuesto	Promedio	Desviación Estándar
Alcaloides	Cafeína (%)	1,18	0,11
	Trigonelina (%)	1,00	0,13
Azúcares	Sacarosa (%)	7,24	0,72
Lípidos	Lípidos (%)	11,68	1,15
Ácidos Clorogénicos	Ácidos Clorogénicos Totales (%)	5,42	0,80
Ácidos grasos libres	Esteárico (%)	7,15	1,31
	Linoleico (%)	40,06	2,88
	Oleico (%)	11,44	2,17
	Araquídico (%)	2,87	0,34
	Palmitico (%)	39,82	5,32

AGRADECIMIENTOS

A la Disciplina de Biometría, doctor Rubén Medina. Al equipo de Experimentación: Carlos Gonzalo Mejía, José Farid López y Jhon Félix Trejos. En la Disciplina de Calidad a Claudia Gómez, Paola Calderón, Wilson Vargas y Víctor Castañeda. Esta investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), proyecto número CAL105003.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización, Curación de datos, Redacción-borrador original: J.P.U.; Análisis formal, Metodología, Validación: J.P.U. y V.O.P.; Redacción- revisión y edición: J.P., V.O. y C.P.G.; Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Andrews, W., & Hammack, T. (2005). Microbiological Methods. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18a ed., pp. 1–252). AOAC International.
- Batista, L. R., Chalfoun, S. M., Silva, C. F., Cirillo, M., Varga, E. A., & Schwan, R. F. (2009). Ochratoxin A in coffee beans (*Coffea arabica* L.) processed by dry and wet methods. *Food Control*, 20(9), 784–790. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.10.003>
- Cano Suárez, H. F., Ciro Velásquez, H. J., y Arango Tobón, J. C. (2018). 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*, 21(2), 439–448. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1068>
- Coradi, P. C., Borém, F. M., Saath, R., & Marques, E. R. (2007). Effect of drying and storage conditions on the quality of natural and washed coffee. *Coffee Science*, 2(1), 38–47. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/5624>
- Corbu, V. M., Gheorghie-Barbu, I., Dumbravă, A. Ștefania, Vrâncianu, C. O., & Șesan, T. E. (2023). Current Insights in Fungal Importance—A Comprehensive Review. *Microorganisms*, 11(6), 1384. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061384>
- Díaz, Y., & Sánchez, M. (2023). Guía preventiva de la inocuidad en empresas destinadas a la producción de alimentos. *Revista Científica Agroecosistemas*, 11(1), 59–66. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/597>
- Erkmen, O. (2022). Counting of important microbial groups from food products. En *Microbiological Analysis of Foods and Food Processing Environments* (pp. 63–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91651-6.00047-1>
- Estrada-Bahena, E. B., Salazar, R., Ramírez, M., Moreno-Godínez, Ma. E., Jiménez-Hernández, J., Romero-Ramírez, Y., González-Cortázar, M., & Alvarez-Fitz, P. (2022). Influence of water activity on physical properties, fungal growth, and ochratoxin A production in dry cherries and green-coffee beans. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(2), e16226. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16226>
- Gómez, C. R., Ortiz, A., Gallego, C., & Echeverri, L. F. (2021). Validación de curvas de calibración por NIRS para la predicción de compuestos químicos de café almendra. *Revista Cenicafé*, 72(2), e72204. <https://doi.org/10.38141/10778/72204>
- Gopinandhan, T. N., Kannan, G. S., Panneerselvam, P., Velmourougane, K., Raghuramulu, Y., & Jayarama, J. (2008). Survey on ochratoxin A in Indian green coffee destined for export. *Food Additives and Contaminants*, 1(1), 51–57. <https://doi.org/10.1080/19393210802236984>
- Hlebová, M., Uzsáková, V., Podhorská, L., Vešelenyiová, D., Mrkvová, M., Čuboň, J., & Hleba, L. (2022). Mycobiota and Co-Occurrence of Mycotoxins in Green and Roasted Coffee Beans. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 11(4), e5779. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.5779>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). NTC 2325:2005 Café verde. Determinación de la pérdida de masa a 105 °C. <https://tienda.icontec.org/gp-cafe-verde-examen-olfativo-y-visual-y-determinacion-de-materia-extrana-y-defectos-ntc2324-2021.html>
- Isquierdo, E. P., Borém, F. M., Oliveira, P. D. D., Siqueira, V. C., & Alves, G. E. (2012). Quality of natural coffee subjected to different rest periods during the drying process. *Ciência e Agrotecnologia*, 36(4), 439–445. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000400008>
- Lachenmeier, D. W., Schwarz, S., Rieke-Zapp, J., Cantergiani, E., Rawel, H., Martín-Cabrejas, M. A., Martuscelli, M., Gottstein, V., & Angeloni, S. (2021). Coffee By-Products as Sustainable Novel Foods: Report of the 2nd International Electronic Conference on Foods—“Future Foods and Food Technologies for a Sustainable World”. *Foods*, 11(1), 3. <https://doi.org/10.3390/foods11010003>
- Levi, C. P., Trenk, H. L., & Mohr, H. K. (1974). Study of the Occurrence of Ochratoxin A in Green Coffee Beans. *Journal of Association of Official Analytical Chemists*, 57(4), 866–870. <https://doi.org/10.1093/jaoac/57.4.866>
- Mahmudiono, T., Fakhri, Y., Sarafraz, M., Mehri, F., Hoseinvandtabar, S., & Mousavi Khaneghah, A. (2023). The prevalence and concentration of ochratoxin A in green coffee-based products: A worldwide systematic review, meta-analysis, and health risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 122, 105423. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105423>
- Mannaa, M., & Kim, K. D. (2017). Influence of Temperature and Water Activity on Deleterious Fungi and Mycotoxin

- Production during Grain Storage. *Mycobiology*, 45(4), 240–254. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2017.45.4.240>
- Maman, M., Sangchote, S., Piasai, O., Leesutthiphonchai, W., Sukorini, H., & Khewkhom, N. (2021). Storage fungi and ochratoxin A associated with arabica coffee bean in postharvest processes in Northern Thailand. *Food Control*, 130, 108351. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108351>
- Oliveira, Evangelista, S. R., Passamani, F. R. F., Santiago, W. D., Cardoso, M. das G., & Batista, L. R. (2019). Influence of temperature and water activity on Ochratoxin A production by *Aspergillus* strain in coffee south of Minas Gerais/Brazil. *LWT*, 102, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.032>
- Oliveros, C. E., Ramírez, C. A., Sanz-Uribe, J. R., Peñuela-Martínez, A. E., & Pabón, J. (2013). 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). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_29
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2006). Good hygiene practices along the coffee chain. FAO. http://www.ico.org/projects/Good-Hygiene-Practices/cnt/cnt_sp/ghpx.html
- Osorio, V. (2021). La calidad del Café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3.a ed., pp. 219–234). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_12
- 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. <https://doi.org/10.38141/10778/73201>
- Pabón, J., & Peñuela, A. E. (2016). Aplicación de agua ozonizada y actividad microbiana en el café pergamino húmedo durante el almacenamiento. *Revista Cenicafé*, 67(2), 7–14. <http://hdl.handle.net/10778/726>
- Pardo, E., Marín, S., Ramos, A. J., & Sanchis, V. (2005). Effect of Water Activity and Temperature on Mycelial Growth and Ochratoxin A Production by Isolates of *Aspergillus ochraceus* on Irradiated Green Coffee Beans. *Journal of Food Protection*, 68(1), 133–138. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.1.133>
- Parra, A., Roa, G., Oliveros, C. E., & Sanz, J. R. (2017). Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino. *Cenicafé*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/librosecado.pdf>
- Puerta, G. I. (2003). Prevenga la ochratoxina A y mantenga la inocuidad y la calidad del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 317, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/361>
- Sousa, T. M. A., Batista, L. R., Passamani, F. R. F., Lira, N. A., Cardoso, M. G., Santiago, W. D., & Chalfoun, S. M. (2019). Evaluation of the effects of temperature on processed coffee beans in the presence of fungi and ochratoxin A. *Journal of Food Safety*, 39(1), e12584. <https://doi.org/10.1111/jfs.12584>
- Van der Merwe, K. J., Steyn, P. S., Fourie, L., Scott, D. B., & Theron, J. J. (1965). Ochratoxin A, a toxic metabolite produced by *Aspergillus ochraceus* Wilh. *Nature*, 205(976), 1112–1113. <https://doi.org/10.1038/2051112a0>
- Van der Stegen, G. H., Essens, P. J., & van der Lijn, J. (2001). Effect of roasting conditions on reduction of ochratoxin A in coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4713–4715. <https://doi.org/10.1021/jf0105586>
- Waters, D. M., Arendt, E. K., & Moroni, A. V. (2017). Overview on the mechanisms of coffee germination and fermentation and their significance for coffee and coffee beverage quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(2), 259–274. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.902804>