

Efecto del aceite esencial de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf (zacate limón) en la conservación de calidad postcosecha de fresa

Effect of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf (lemongrass) essential oil on the postharvest quality preservation of strawberries

Anareli Quintero Jiménez¹  ^{ib}, Laura Sofía Castillo Ortega²  ^{ib} and Edgar López López^{3*}  ^{ib}

¹ Universidad de Guanajuato Departamento de Ingeniería Agroindustrial, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Programa de Ingeniería en Biotecnología, Av. Mutualismo Esq. Prolongación Río Lerma S/N, Celaya, Gto. C.P. 38060.

² Centro Nacional de Referencia de Inocuidad y Bioseguridad Agroalimentaria (CNRIBA) Departamento de Análisis moleculares y nuevas tecnologías. Km. 37.5 carretera México-Pachuca, Tecámac, Edo. de México, C.P. 55740.

³ Lab. de Agrobiotecnología, Universidad Tecnológica de Mineral de la Reforma. Camino Providencia - La Calera 1000, Ex Hacienda Chavarría, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42186. Tel. +52 7713028740.

ABSTRACT

The effect of lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) on the postharvest quality of strawberries was evaluated over 21 days of storage at 4°C. Lemongrass essential oil at 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 % was employed, compared to a negative control and a positive control using Microdyn. Treatments with 1.5 and 2.0 % essential oil were the most effective in preserving firmness, moisture content, and antioxidant activity, maintaining the visual freshness of the fruit. In contrast, treatments with 0.5 and 1.0 % concentrations, as well as the negative control, showed a rapid loss of quality, with an increase in total soluble solids and reducing sugars. Antioxidant activity remained high in the treatments with 1.5 and 2.0 %, suggesting that the essential oil slowed down oxidative processes. The results indicate that *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil at 1.5 and 2.0 % concentrations are comparable to commercial preservatives like Microdyn, presenting itself as a natural alternative to increase the shelf life of fresh strawberries without resorting to synthetic chemicals. This approach has relevant implications for the fresh food industry in the pursuit of more sustainable preservation methods.

Keywords: Citral, preservative, antioxidant, antimicrobial, biopreservation.

RESUMEN

Se evaluó el efecto del aceite esencial de zacate limón (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) sobre la calidad postcosecha en frutos de fresas durante 21 días de almacenamiento a 4°C. Se emplearon concentraciones de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 % de aceite esencial de zacate limón, comparándolas con un control negativo y un control positivo con Microdyn. Los tratamientos con 1.5 y 2.0 % de aceite esencial fueron los más efectivos en la conservación de la firmeza, el contenido de humedad y la actividad antioxidante, manteniendo la frescura visual del fruto. En contraste, los tratamientos con concentraciones de 0.5 y 1.0 % así como el control negativo, mostraron una rápida pérdida de calidad, con un incremento en los sólidos solubles totales y azúcares reductores. La acti-

vidad antioxidante se mantuvo alta en los tratamientos con 1.5 y 2.0 %, lo que sugiere que el aceite esencial ralentizó los procesos oxidativos. Los resultados indicaron que el aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf a concentraciones de 1.5 y 2.0 % es comparable con los conservantes comerciales como Microdyn, presentándose como una alternativa natural para prolongar la vida útil de fresas frescas sin recurrir a químicos sintéticos. Este enfoque tiene implicaciones relevantes para la industria de alimentos frescos en la búsqueda de métodos de conservación más sostenibles.

Palabras clave: Citral, conservante, antioxidante, antimicrobiano, bioconservación.

INTRODUCCIÓN

La fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.), conocida por su alto valor nutricional, antioxidantes y su atractivo sabor, es una de las frutas más populares y comercialmente importantes en la industria alimentaria (Giampieri *et al.*, 2012); sin embargo, debido a su alta perecibilidad, la conservación de fresa representa un desafío para su comercialización a gran escala, ya que en condiciones óptimas de almacenamiento, como una temperatura de 0 °C y una humedad relativa del 90-95 %, las fresas tienen una vida útil poscosecha de aproximadamente 5 a 7 días (Jalali *et al.*, 2020). La vida de anaquel de la fresa se ve limitada principalmente por su rápida pérdida de agua, deterioro textural y proliferación de patógenos como *Botrytis cinerea*, responsable de la podredumbre gris, una de las principales causas de pérdidas en postcosecha (Sharma *et al.*, 2009). Además, el desarrollo e infectividad de *B. cinerea* es favorecido por compuestos volátiles presentes en el frutos, presencia de agua en forma de película, así como la propia madurez del fruto, mostrando signos de la enfermedad como crecimiento de moho gris y latencia en frutos inmaduros (Neri *et al.*, 2015).

La solución del problema post cosecha de la fresa se ha resuelto por medio de diferentes métodos de conservación, entre los que destacan la refrigeración y las atmósferas modificadas (Bhat y Stamminger, 2016). La refrigeración,

*Autor para correspondencia: Edgar López López

Correo-e: e_lopez_87@hotmail.com

Recibido: 4 de octubre de 2024

Aceptado: 3 de enero de 2025

Publicado: 7 de febrero de 2025

ampliamente utilizada en los procesos de transporte y almacenamiento, disminuye la actividad metabólica de la fruta y reduce la proliferación de microorganismos patógenos, pero no resuelve completamente el problema, ya que las fresas sufren un deterioro en su calidad aun en condiciones controladas después de un corto período, generalmente entre 5 y 7 días (Wang *et al.*, 2018). Las atmósferas modificadas, por su parte, han mostrado ser útiles para reducir el crecimiento de hongos y aumentar el tiempo de almacenamiento, aunque su implementación puede ser costosa y compleja debido a los requerimientos específicos de cada producto, materiales especializados y monitoreo constante de condiciones internas (Kargwal *et al.*, 2020).

Ante estas problemáticas, ha aumentado la búsqueda de alternativas naturales para la conservación poscosecha destacando principalmente el uso de aceites esenciales debido a sus propiedades antimicrobianas. Los aceites esenciales, al ser compuestos volátiles extraídos de plantas aromáticas, contienen una alta concentración de metabolitos secundarios como terpenos y fenoles, los cuales han demostrado ser efectivos en la inhibición del crecimiento de bacterias, hongos, y levaduras (De Sousa *et al.*, 2023). Entre los aceites más estudiados se encuentran los de orégano (*Origanum vulgare* L.), canela (*Cinnamomum verum* J.Presl) y clavo de olor (*Syzygium aromaticum* L.), mismos que han sido aplicados con éxito en la conservación de frutas frescas, incluyendo las fresas, alargando su vida útil sin comprometer su calidad sensorial (Shehata *et al.*, 2020).

Uno de los aceites esenciales que ha ganado atención es el aceite de *C. citratus* (DC.) Stapf, comúnmente conocido como zacate limón o té limón, caracterizado por su alto contenido de citral (hasta un 85 % de su composición) y poseer propiedades antimicrobianas (Okpo y Edeh, 2023; Sahal *et al.*, 2020). Diversos estudios han demostrado su eficacia en la inhibición de microorganismos patógenos en productos frescos, incluyendo *B. cinerea*, *Fusarium* spp. y *Aspergillus* spp., responsables del deterioro de la fresa durante la postcosecha (Liu *et al.*, 2016; Sonker *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2021). Esto sugiere que el aceite de *C. citratus* (DC.) Stapf tiene potencial como alternativa natural a los conservantes sintéticos, ofreciendo una solución ecológica y segura para la conservación de productos agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se utilizaron fresas (*Fragaria × ananassa* Duch.) recolectadas de la localidad de Santiago de Anaya, ubicada en el estado de Hidalgo, Méx., conocida por su creciente producción de fresas debido a su clima templado y suelos fértiles, caracterizados por ser de textura franca, con un pH ligeramente ácido (6.2 ± 0.3), un contenido de materia orgánica del 3.5 %, y una conductividad eléctrica de 1.2 dS/m, lo que favorece el crecimiento de cultivos hortícolas (Domínguez *et al.*, 2017). La zona de colecta se identificó con las coordenadas geográficas 20.2830° N, 99.0420° O, a una altitud de 1,980 msnm. La recolección se llevó a cabo durante la temporada

de primavera, en el mes de abril, cuando las condiciones climáticas fueron óptimas para el desarrollo del cultivo, con temperaturas promedio diurnas de 22 °C y nocturnas de 12 °C.

Las fresas seleccionadas presentaron un estado óptimo de madurez, evaluado mediante una escala de madurez fisiológica basada en el color de la epidermis, seleccionando frutos con un color rojo uniforme en su superficie. Además, se aseguraron de presentar firmeza adecuada y ausencia de daños visibles o ataques de plagas. Cada fruto fue recolectado manualmente para asegurar la uniformidad en los bioensayos y posteriormente, se colocaron en contenedores plásticos limpios y ventilados para evitar contaminación cruzada.

El material vegetal de *C. citratus* (DC.) Stapf fue identificado visualmente en campo con ayuda de los productores locales y recolectado en la comunidad de El Jiadi, municipio de Atotonilco el Grande, Hidalgo, México, de coordenadas geográficas 20°17'00" N latitud y 98°40'00" O longitud, así como una altitud de 2,000 msnm y posteriormente la identificación botánica de la especie se realizó utilizando claves taxonómicas y descripciones detalladas reportadas (Torres *et al.*, 2018). Se cortaron las hojas en horas matutinas, entre las 7:00 y las 9:00 a.m., durante la etapa fenológica de máximo desarrollo vegetativo, cuando las hojas presentan su mayor contenido de metabolitos secundarios, siguiendo las recomendaciones de Madi *et al.* (2020). El material colectado fue colocado en bolsas de papel kraft para permitir la transpiración y evitar la acumulación de humedad. Posteriormente, las hojas se mantuvieron en refrigeración a 4 °C hasta su procesamiento, asegurando la preservación de sus propiedades.

Extracción, rendimiento de aceite e identificación de compuestos

Para el proceso de extracción de aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf, se llevó a cabo mediante hidrodestilación en el Laboratorio de Agrobiotecnología de la Universidad Tecnológica de Mineral de la Reforma, Hidalgo, Mex., empleando 1.5 kg de hojas frescas, cortadas en trozos pequeños homogéneos y colocadas en un destilador de acero inoxidable con capacidad de 6 L. El sistema se conectó a una fuente de calor, que permitió generar vapor a 100°C durante un periodo de 3 h. El vapor, al pasar a través del material vegetal, arrastró los compuestos volátiles, por medio de condensación y se separaron en un decantador de dos fases. El aceite esencial se obtuvo de la fase superior y almacenado en frascos de vidrio ámbar bajo condiciones de refrigeración (4°C) para evitar su degradación. El rendimiento del aceite esencial se calculó con respecto a la proporción entre la masa de aceite obtenida y la masa de material vegetal procesado.

El análisis del aceite esencial obtenido se realizó utilizando un cromatógrafo de gases modelo Agilent 7890B, equipado con una columna capilar de alta resolución DB-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 µm). La separación de los compuestos, consistió en un programa de temperatura que comenzó a partir de 60°C, con incrementos de 5°C/min, hasta alcanzar



los 250°C. El gas portador fue helio, con un flujo constante de 1 mL/min. Los compuestos separados fueron detectados mediante un espectrómetro de masas Agilent 5977B, utilizando ionización por impacto electrónico (EI) a 70 eV. Los espectros de masas obtenidos fueron comparados con la base de datos espectrométrica del National Institute of Standards and Technology (NIST 05) para la identificación de los compuestos presentes en el aceite esencial. Se incluyeron únicamente aquellos compuestos que presentaron una similitud superior al 90 % en los espectros de masas respecto a los estándares de la base de datos.

Bioensayo de aceites esenciales en frutos

El aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf fue diluido en diferentes concentraciones, para evaluar su efecto en la conservación postcosecha de las fresas, para ello, se prepararon diluciones en emulsiones acuosas con Tween 80 como surfactante (a una concentración de 0.1 % v/v) para mejorar la dispersión del aceite en agua. Las concentraciones evaluadas del aceite esencial fueron: 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 % (v/v), con base en estudios previos que han utilizado aceites esenciales en frutas frescas (Athayde *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2018).

Los tratamientos experimentales fueron diferentes concentraciones de aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf y dos controles (testigos). Para cada tratamiento, se seleccionaron 10 fresas por repetición, considerando las cuatro concentraciones, el control positivo y el control negativo, cada uno con cuatro réplicas. Las fresas se sumergieron en las respectivas emulsiones durante 5 min, asegurando un contacto uniforme entre la solución y la superficie del fruto. Posteriormente, los frutos fueron retirados de las emulsiones y dejados secar al aire a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) durante 30 min antes de ser almacenados bajo condiciones de refrigeración a 4 °C. El control negativo consistió en fresas tratadas únicamente con agua destilada y Tween 80 al 0.1 % (v/v), mientras que el control positivo utilizó un conservante comercial (Microdyn) al 0.1 % (v/v). Cada tratamiento y control fue realizado en cuatro repeticiones y las fresas fueron evaluadas diariamente para monitorear la incidencia de patógeno, así como el deterioro físico durante el almacenamiento.

El efecto de los tratamientos con aceite esencial sobre la conservación de los frutos, se implementó una escala visual de daño con una escala numérica de 1 a 5, tal como se muestra en la Tabla 1, basada en estudios previos como los reportados por Trejo *et al.* (2015), quienes utilizaron escalas similares en la evaluación de frutas postcosecha. Para determinar la incidencia de la enfermedad, se calculó el porcentaje de frutos afectados en cada tratamiento y repetición, dividiendo el número de frutos con signos visibles de infección entre el total de frutos evaluados y multiplicando por 100. Este método permitió cuantificar la proporción de frutos infectados independientemente de la severidad del daño.

Las fresas se almacenaron a 4°C y se evaluaron diariamente durante 21 días, siguiendo metodologías reportadas en estudios postcosecha de frutas similares como fresas y frambuesas (Liu *et al.*, 2016; Sharma *et al.*, 2009). Esta fre-

Tabla 1. Escala empleada para evaluación del daño a frutos.

Table 1. Scale used for the evaluation of fruit damage.

Puntuación	Descripción del daño
1	Fruto sin signos visibles de descomposición o daño (fruto completamente sano).
2	Daño ligero (<10 % de la superficie afectada), sin signos de descomposición significativa.
3	Daño moderado (10-25 % de la superficie afectada), con presencia de lesiones leves.
4	Daño severo (25-50 % de la superficie afectada), con signos visibles de descomposición.
5	Daño extremo (>50 % de la superficie afectada), fruto completamente descompuesto.

cuencia de evaluación se eligió considerando los tiempos reportados en la literatura para el crecimiento y propagación de patógenos como *B. cinerea* y *Fusarium spp.*, que suelen manifestarse en las primeras semanas de almacenamiento bajo condiciones de refrigeración (0 a 3 °C) (Wang *et al.*, 2018).

Las observaciones visuales fueron realizadas bajo condiciones de iluminación constantes utilizando una luz blanca fría de 1000 lux para asegurar una visibilidad adecuada de las características superficiales de las fresas y estas fueron manipuladas cuidadosamente, para evitar daños mecánicos adicionales. Cada tratamiento fue evaluado por cuadruplicado, y los datos obtenidos se registraron diariamente en una tabla de progreso del daño. Los resultados se analizaron utilizando un análisis de varianza ANOVA de una vía y la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), para identificar las diferencias significativas entre los tratamientos y los controles.

Evaluación de parámetros de calidad de frutos

Se evaluó la calidad de los frutos de fresas en los diferentes tratamientos de acuerdo con los siguientes parámetros:

a) Firmeza. Se evaluó mediante un texturómetro (TA.XT Plus, Stable Micro Systems, Reino Unido), utilizando una sonda cilíndrica de acero inoxidable con un diámetro de 5 mm. Inicialmente, las fresas se mantuvieron a 20°C durante 1 hora, con el fin de homogeneizar la temperatura de los frutos y evitar que las condiciones de refrigeración afectaran la consistencia de los datos, el equipo fue calibrado al inicio de las mediciones, así como cada vez que se iniciaba una nueva sesión experimental para garantizar la precisión y consistencia de los resultados. Posteriormente, las mediciones se realizaron aplicando una fuerza de penetración en el centro del fruto, con una profundidad de 10 mm y una velocidad de penetración constante de 1 mm/s. Las mediciones se expresaron en Newtons (N), para reflejar la resistencia del fruto a la penetración. La firmeza de las fresas se midió a los días 1, 7, 14 y 21 del experimento.

b) Sólidos solubles totales (SST). Se determinaron mediante un refractómetro digital portátil (modelo PAL-1, Atago, Japón), calibrado con agua destilada antes de cada medición. Se extrajo jugo fresco de los frutos, utilizando un

exprimidor manual para evitar la degradación enzimática del jugo. Las mediciones se realizaron en triplicado al inicio del experimento y cada 3 días durante el almacenamiento a 4°C. Los resultados se expresaron en grados Brix (°Bx), que indican la concentración de azúcares en el jugo del fruto.

c) Azúcares reductores. Se cuantificaron utilizando el método DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico), siguiendo el protocolo de Miller (1959), con modificaciones para su aplicación en frutas. Se prepararon extractos de jugo fresco de fresas, los cuales fueron centrifugados a 10,000 rpm durante 10 min para eliminar sólidos en suspensión. A continuación, se mezclaron 0.5 mL de extracto con 0.5 mL de reactivo DNS y se incubaron en un baño de agua a 95°C durante 5 min. Posteriormente, las muestras se enfriaron en agua con hielo y 4 mL de agua destilada para diluir. La absorbancia de las muestras se midió a 540 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (modelo Genesys 10S, Thermo Scientific, EE.UU.). Los resultados se expresaron como miligramos de glucosa equivalentes por gramo de peso fresco (mg/g). Las mediciones se realizaron por cuadruplicado al inicio del experimento y cada 3 días durante el almacenamiento a 4°C. Este método permitió cuantificar los azúcares simples que participan en los procesos de degradación y maduración, proporcionando una indicación directa del impacto de los tratamientos en el contenido de azúcares de las fresas.

d) Contenido de humedad. Se determinó utilizando el método gravimétrico, secando una muestra de 10 g de pulpa fresca en una estufa de convección (modelo Memmert UN55, Alemania), a 65°C hasta peso constante. Las muestras (fresas) se seleccionaron al azar de cada tratamiento y posteriormente fueron trituradas hasta obtener una consistencia homogénea. Las mediciones se realizaron al inicio del experimento y cada 3 días durante el almacenamiento a 4°C. La pérdida de peso durante el secado se utilizó para calcular el porcentaje de humedad, expresado como la relación entre la pérdida de agua y el peso fresco inicial de la muestra. Este parámetro fue crucial para evaluar la deshidratación del fruto durante el almacenamiento, ya que una mayor pérdida de agua está directamente asociada con la reducción de la calidad visual y textural.

e) Actividad antioxidante. Se determinó utilizando el método de captura de radicales libres DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo). Para esto, se prepararon extractos de pulpa de fresa de 10 g, homogenizados en 50 mL de metanol al 80 % y centrifugados a 10,000 rpm durante 15 min. El sobrenadante fue recolectado y utilizado para su análisis. Para la medición, se mezclaron 100 µL del extracto con 2.9 mL de solución de DPPH (0.1 mM en metanol) y se dejaron reaccionar en la oscuridad durante 30 min a temperatura ambiente. La absorbancia de la mezcla se midió a 517 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (modelo Genesys 10S, Thermo Scientific, EE.UU.). Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición de DPPH, comparando la absorbancia de la muestra con un

blanco control (metanol puro). Las mediciones se realizaron por cuadruplicado al inicio del experimento y cada 3 días durante el almacenamiento a 4°C. La actividad antioxidante está asociada con la capacidad del fruto para neutralizar radicales libres, un indicador importante de la estabilidad de compuestos bioactivos y el potencial beneficio para la salud del consumidor.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de los parámetros de calidad de fruto se analizaron estadísticamente mediante un análisis de varianza ANOVA de una vía, para determinar las diferencias significativas entre los tratamientos. Se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) para identificar diferencias significativas entre los tratamientos. Los resultados se expresaron como promedios con desviación estándar, y las diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos se indicaron con letras diferentes en las tablas. Todos los análisis se realizaron utilizando el software estadístico SPSS (v. 17, IBM Corp., Armonk, NY, EE.UU.), garantizando que los datos cumplieran con los supuestos de normalidad y homocedasticidad antes de realizar el ANOVA. Para comparar los resultados obtenidos de los tratamientos evaluados junto con los controles se realizó un análisis de componentes principales (ACP) mediante el software estadístico PAST versión 4.03.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de aceite esencial e identificación de compuestos

El rendimiento del aceite esencial obtenido de *C. citratus* (DC.) Stapf fue de 0.32 %, con base al peso fresco del material vegetal. Este rendimiento concuerda con lo reportado en estudios similares, donde los rendimientos para esta especie oscilan entre 0.2 y 0.4 %, dependiendo de las condiciones de cultivo y cosecha (Zaman *et al.*, 2022). El rendimiento obtenido coincide con los reportado por Madi *et al.* (2020) quienes reportaron un rendimiento de 0.35 % utilizando hidrodestilación en condiciones controladas, mientras que Oliveira *et al.* (2018) documentaron rendimientos cercanos al 0.4 %, bajo condiciones óptimas de cultivo. Estos valores dependen de varios factores, incluyendo la época de cosecha, las condiciones climáticas y el método de extracción.

En cuanto al análisis cromatográfico del aceite esencial, (Tabla 2), se muestra una composición rica en monoterpenos, donde los compuestos mayoritarios fueron citral A (geranial) y citral B (neral), sumando más del 70 % del total. Igualmente, se identificaron otros compuestos relevantes como mirceno, limoneno, geraniol, entre otros. Esta composición es consistente con lo reportado en la literatura, donde el citral es reconocido por sus propiedades antimicrobianas, antifúngicas y antioxidantes, lo que lo convierte en el componente principal de interés en aplicaciones de conservación de alimentos (Maqbool *et al.*, 2010; Mancini *et al.*, 2015).

El contenido de citral obtenido (73.9 % combinado entre citral A y B) es consistente con los estudios realizados en



Tabla 2. Composición química del aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf.
Table 2. *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil chemical composition.

Compuesto	Fórmula química	% Composición
Citral A (Geranial)	C ₁₀ H ₁₆ O	41.82
Citral B (Neral)	C ₁₀ H ₁₆ O	32.27
Mirceno	C ₁₀ H ₁₆	12.75
Limoneno	C ₁₀ H ₁₆	2.42
Geraniol	C ₁₀ H ₁₈ O	1.85
β-Cariofileno	C ₁₅ H ₂₄	1.42
γ-Terpineno	C ₁₀ H ₁₆	1.21
Linalol	C ₁₀ H ₁₈ O	1.05
Otros	-	5.21
Total		100.0

aceites esenciales de *C. citratus* (DC.) Stapf, donde el citral es el principal componente (Santín *et al.*, 2009). Este compuesto es reconocido por sus potentes propiedades antimicrobianas, y lo convierte en un componente ideal para aplicaciones de conservación de alimentos (Sahal *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2021). La proporción de citral observada en este estudio está dentro del rango reportado por Madi *et al.* (2020), quienes documentaron concentraciones de citral entre 70-75 %, con concentraciones más altas en muestras de otoño y verano (82 y 80 % respectivamente), dependiendo de las condiciones de extracción y cultivo. Además, el contenido de otros compuestos como el mirceno y limoneno complementa el perfil bioactivo del aceite, aportando capacidades antioxidantes y antifúngicas adicionales (Salaria *et al.*, 2021). Comparado con otras fuentes vegetales de aceites esenciales, *C. citratus* (DC.)

Stapf se distingue por la alta concentración de monoterpenos como el citral, lo que maximiza su efectividad en la inhibición de microorganismos que causan deterioro postcosecha, como *B. cinerea* y *Colletotrichum* spp. (Yan *et al.*, 2021). En este sentido, su uso en microdosis es suficiente para prolongar la vida de anaquel de productos perecederos como las fresas, lo cual se refuerza con el perfil químico observado. En estudios previos, se destaca el papel de compuestos como el geraniol y el β-cariofileno, que, aunque presentes en menores concentraciones, tienen efectos sinérgicos en combinación con el citral, aumentando la efectividad antimicrobiana general del aceite esencial (Krishnaveni *et al.*, 2022; Vyshali *et al.*, 2015). Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio confirman el potencial de *C. citratus* (DC.) Stapf como una fuente rica de compuestos volátiles bioactivos, adecuados para la conservación de alimentos.

Bioensayo de aceites esenciales en frutos

Se observó que las concentraciones más altas de aceite (1.0 y 2.0 %) fueron significativamente más efectivas en la reducción del daño en comparación con el control negativo (Tabla 3), y presentaron resultados similares al control positivo (Microdyn). A lo largo del bioensayo, las fresas tratadas con aceite esencial al 2.0 % presentaron un daño promedio de 2.3 al final del día 21, mientras que las del control negativo alcanzaron un daño de 4.9, lo que sugiere un deterioro severo en el grupo sin tratamiento. En los tratamientos con 1.0 y 0.5 %, se observó una reducción en el daño en comparación con

Tabla 3. Evaluación del daño en fresas tratadas con aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf. Los valores son el promedio de acuerdo a la escala de evaluación del daño a frutos.

Table 3. Damage evaluation in strawberries treated with *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil. The values represent the average based on the fruit damage assessment scale.

Día	T1: Aceite esencial 0.5 %	T2: Aceite esencial 1.0 %	T3: Aceite esencial 1.5 %	T4: Aceite esencial 2.0 %	Control negativo 0 %	Control positivo Microdyn 0.1 %
1	1.0 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	1.5 ± 0.2b	1.0 ± 0.1a
2	1.1 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	1.8 ± 0.2b	1.1 ± 0.1a
3	1.3 ± 0.2a	1.1 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	2.0 ± 0.3b	1.2 ± 0.1a
4	1.4 ± 0.2a	1.2 ± 0.2a	1.1 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	2.3 ± 0.3b	1.3 ± 0.1a
5	1.5 ± 0.2a	1.3 ± 0.2a	1.1 ± 0.1a	1.0 ± 0.1a	2.5 ± 0.3b	1.4 ± 0.1a
6	1.7 ± 0.3a	1.5 ± 0.2a	1.2 ± 0.1a	1.1 ± 0.1a	2.7 ± 0.3b	1.5 ± 0.1a
7	2.0 ± 0.3b	1.6 ± 0.2a	1.4 ± 0.1a	1.2 ± 0.1a	2.9 ± 0.4b	1.6 ± 0.2a
8	2.2 ± 0.3b	1.7 ± 0.2a	1.5 ± 0.2a	1.3 ± 0.1a	3.2 ± 0.4c	1.7 ± 0.2a
9	2.4 ± 0.3b	1.9 ± 0.2a	1.6 ± 0.2a	1.4 ± 0.1a	3.5 ± 0.4c	1.8 ± 0.2a
10	2.6 ± 0.3b	2.0 ± 0.2a	1.7 ± 0.2a	1.5 ± 0.1a	3.7 ± 0.4c	1.9 ± 0.2a
11	2.8 ± 0.3b	2.1 ± 0.2a	1.9 ± 0.2a	1.6 ± 0.1a	3.9 ± 0.4c	2.0 ± 0.2a
12	3.0 ± 0.3b	2.3 ± 0.2a	2.0 ± 0.2a	1.7 ± 0.1a	4.1 ± 0.4c	2.1 ± 0.2a
13	3.3 ± 0.3b	2.5 ± 0.2a	2.2 ± 0.2a	1.8 ± 0.1a	4.3 ± 0.4c	2.2 ± 0.2a
14	3.6 ± 0.3b	2.8 ± 0.2a	2.3 ± 0.2a	1.9 ± 0.1a	4.5 ± 0.4c	2.3 ± 0.2a
15	3.8 ± 0.3b	3.0 ± 0.2a	2.4 ± 0.2a	2.0 ± 0.1a	4.6 ± 0.4c	2.4 ± 0.2a
16	4.0 ± 0.4b	3.2 ± 0.3a	2.5 ± 0.2a	2.1 ± 0.1a	4.7 ± 0.4c	2.5 ± 0.2a
17	4.2 ± 0.4b	3.4 ± 0.3a	2.6 ± 0.2a	2.2 ± 0.1a	4.8 ± 0.4c	2.6 ± 0.2a
18	4.4 ± 0.4b	3.5 ± 0.3a	2.7 ± 0.2a	2.3 ± 0.1a	4.8 ± 0.4c	2.7 ± 0.2a
19	4.5 ± 0.4b	3.5 ± 0.3a	2.8 ± 0.2a	2.3 ± 0.1a	4.9 ± 0.4c	2.8 ± 0.2a
20	4.5 ± 0.4b	3.5 ± 0.3a	2.8 ± 0.2a	2.3 ± 0.1a	4.9 ± 0.4c	2.9 ± 0.2a
21	4.5 ± 0.4b	3.5 ± 0.3a	2.8 ± 0.2a	2.3 ± 0.1a	4.9 ± 0.4c	2.9 ± 0.2a

* Los resultados se muestran como promedios del daño en las fresas en escala de 1 a 5. Letras diferentes (dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre los tratamientos (p ≤ 0.05).



el control negativo, no obstante, el tratamiento con 0.5 % fue significativamente menos efectivo a partir del día 7.

El tratamiento con aceite al 2.0 % mostró un promedio de daño de 2.3 al final del experimento, lo que es comparable con los resultados obtenidos en el control positivo tratado con Microdyn, que presentó un daño promedio de 2.9. Por otro lado, el tratamiento con 0.5 % de aceite esencial resultó significativamente menos efectivo, alcanzando un daño promedio de 4.5 al final de los 21 días, lo que se asemeja a los resultados del control negativo. Esto indica que las concentraciones más bajas de aceite esencial (0.5 y 1.0 %) no son suficientes para prevenir el deterioro a largo plazo.

La incidencia de la enfermedad, mostró diferencias significativas entre los tratamientos. Las fresas tratadas con concentraciones de 1.5 y 2.0 % de aceite esencial presentaron una incidencia menor respecto del control negativo y los tratamientos de concentraciones más bajas (0.5 y 1.0 %). Al final del almacenamiento (día 21), los frutos tratados con 2.0 % mostraron una incidencia promedio de 10 %, mientras que los tratados con 1.5 % presentaron una incidencia del 15 %. En contraste, los tratamientos con 0.5 % y 1.0 % registraron incidencias del 35 % y 25 %, respectivamente. El control negativo presentó la mayor incidencia, alcanzando un 60 %, mientras que el control positivo mostró una incidencia de 20 %. Con lo cual se refleja la eficacia de las concentraciones más altas de aceite esencial de *C. citratus* para reducir la proporción de frutos infectados, posiblemente debido a su actividad antimicrobiana.

En la Figura 1 se muestra la comparación del tratamiento T4 (2.0 % aceite esencial) con el control negativo después de 14 días de almacenamiento, en el que se observa la incidencia de un hongo fitopatógeno, posiblemente *B. cinerea*, caracterizado por la presencia de crecimiento micelial grisáceo y áreas de necrosis en la superficie del fruto (Liu *et al.*, 2016). Evidenciando así, los efectos del almacenamiento sin tratamiento con aceite esencial ni conservantes comerciales.

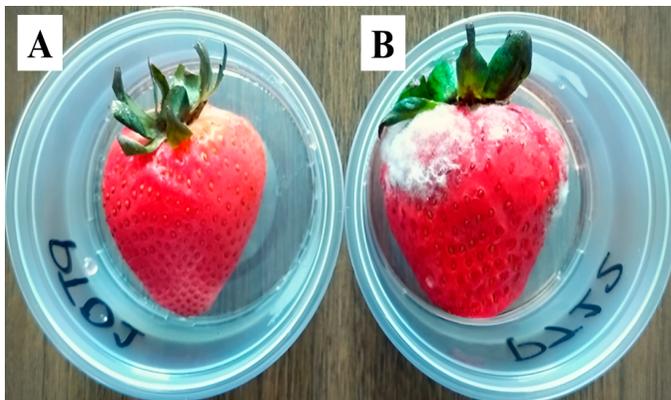


Figura 1. Comparación del tratamiento T4 con 2.0 % aceite esencial (A) y el Control negativo con agua destilada, Tween 20 y 0 % aceite esencial (B) después de 14 días de almacenamiento.

Figure 1. Comparison of treatment T4 with 2.0 % essential oil (A) and the negative control with distilled water, Tween 20, and 0 % essential oil (B) 14 days after storage.

Evaluación de parámetros de calidad de frutos

a) Firmeza

Las fresas tratadas con concentraciones de 1.5 y 2.0 % de aceite esencial, mantuvieron una firmeza considerablemente mayor en comparación con el control negativo (Tabla 4). Al final de la evaluación, las fresas tratadas con 2.0 % de aceite esencial presentaron una firmeza promedio de 2.7 N, en contraste con las fresas del control negativo, cuya firmeza disminuyó significativamente hasta 0.9 N. El tratamiento con 1.5 % de aceite esencial mantuvo un promedio de 2.5 N al final del período de almacenamiento, lo que sugiere que estos tratamientos son efectivos para reducir la descomposición estructural de las fresas (Hoseini *et al.*, 2019). Sin embargo, los tratamientos con menores concentraciones de aceite esencial (0.5 % y 1.0 %) mostraron una tendencia a la pérdida de firmeza, con valores entre 1.8 N y 1.4 N, respectivamente, al final del almacenamiento. Los frutos del control negativo experimentaron una pérdida significativa de firmeza, lo que es indicativo de una mayor tasa de deterioro, asociado con el aumento de la actividad enzimática y la degradación de la pectina, lo que lleva a una textura más blanda, fenómeno común en frutos sin tratamiento durante el almacenamiento (Vicente *et al.*, 2005).

b) Sólidos solubles totales (SST)

Los SST se mantuvieron relativamente estables en los tratamientos con concentraciones más altas de aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf (1.5 y 2.0 %) a lo largo de la evaluación como se aprecia en la Tabla 5. En contraste, los tratamientos con concentraciones menores (0.5 y 1 %) y el control negativo mostraron un aumento en los SST, lo que es indicativo de la progresión del proceso de maduración y descomposición del fruto. El tratamiento con 2.0 % de aceite esencial mantuvo valores de SST más consistentes, con un promedio final de 7.5 °Brix, mientras que el control negativo alcanzó valores cercanos a 9.0 °Brix (Tabla 5), lo que sugiere una descomposición avanzada. El tratamiento con Microdyn, utilizado como control positivo, mostró un comportamiento similar al tratamiento con 2.0 % de aceite esencial. Los resultados son consistentes con estudios previos que sugieren que los aceites esenciales ricos en citral pueden influir en el metabolismo de los azúcares, alargando la vida útil de las frutas (Sonker *et al.*, 2014).

c) Azúcares reductores

La concentración de azúcares reductores en las fresas tratadas con aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf mostró diferencias a lo largo del periodo evaluado (Tabla 6). Los tratamientos con 1.5 y 2.0 % de aceite esencial mantuvieron niveles de azúcares reductores más estables, mientras que los tratamientos con 0.5 %, 1.0 % y el control negativo presentaron un incremento significativo en los días finales (14 y 21), lo que indica una mayor tasa de maduración y descomposición de acuerdo con lo reportado (Woodward, 1972). Las fresas tratadas con 1.5 y 2.0 % de aceite esencial mantuvieron niveles más estables de azúcares reductores, mientras que el

Tabla 4. Firmeza de las fresas tratadas con aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf (Promedio en Newtons).

Table 4. Firmness of strawberries treated with *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil (Average in Newtons).

Día	T1: Aceite esencial 0.5 %	T2: Aceite esencial 1.0 %	T3: Aceite esencial 1.5 %	T4: Aceite esencial 2.0 %	Control negativo 0 %	Control positivo Microdyn 0.1 %
1	3.5 ± 0.2a	3.6 ± 0.2a	3.8 ± 0.2a	3.9 ± 0.2a	3.4 ± 0.2a	3.7 ± 0.2a
7	3.0 ± 0.3b	2.9 ± 0.3b	3.5 ± 0.2a	3.7 ± 0.2a	2.5 ± 0.3c	3.5 ± 0.2a
14	2.5 ± 0.3b	2.2 ± 0.3b	3.2 ± 0.2a	3.5 ± 0.2a	1.8 ± 0.3c	3.2 ± 0.2a
21	1.8 ± 0.4b	1.4 ± 0.4c	2.5 ± 0.3a	2.7 ± 0.3a	0.9 ± 0.4d	2.5 ± 0.3a

*Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre los tratamientos para un día específico (p ≤ 0.05).

Tabla 5. Sólidos solubles totales (SST) de las fresas tratadas con aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf (Promedio en °Brix).

Table 5. Total soluble solids (TSS) of strawberries treated with *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil (Average in °Brix).

Día	T1: Aceite esencial 0.5 %	T2: Aceite esencial 1.0 %	T3: Aceite esencial 1.5 %	T4: Aceite esencial 2.0 %	Control negativo 0 %	Control positivo Microdyn 0.1 %
1	6.5 ± 0.1a	6.5 ± 0.1a	6.4 ± 0.1a	6.4 ± 0.1a	6.5 ± 0.1a	6.4 ± 0.1a
7	7.1 ± 0.2a	7.0 ± 0.2a	6.6 ± 0.1a	6.5 ± 0.1a	7.4 ± 0.2b	6.5 ± 0.1a
14	7.6 ± 0.3a	7.5 ± 0.3a	6.7 ± 0.1a	6.5 ± 0.1a	8.1 ± 0.3b	6.6 ± 0.1a
21	8.2 ± 0.3b	7.9 ± 0.3b	7.0 ± 0.2a	7.5 ± 0.2a	9.0 ± 0.3c	7.2 ± 0.2a

*Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre los tratamientos para un día específico (p ≤ 0.05).

Tabla 6. Azúcares reductores en fresas tratadas con aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf (mg/g de peso fresco).

Table 6. Reducing sugars in strawberries treated with *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil (mg/g of fresh weight).

Día	T1: Aceite esencial 0.5 %	T2: Aceite esencial 1.0 %	T3: Aceite esencial 1.5 %	T4: Aceite esencial 2.0 %	Control negativo 0 %	Control positivo Microdyn 0.1 %
1	3.2 ± 0.1a	3.1 ± 0.1a	3.0 ± 0.1a	3.0 ± 0.1a	3.2 ± 0.1a	3.0 ± 0.1a
7	3.5 ± 0.2b	3.4 ± 0.2b	3.1 ± 0.1a	3.0 ± 0.1a	3.9 ± 0.2c	3.2 ± 0.1a
14	4.1 ± 0.3b	4.0 ± 0.3b	3.3 ± 0.2a	3.1 ± 0.2a	4.7 ± 0.3c	3.5 ± 0.2a
21	5.2 ± 0.3c	5.0 ± 0.3c	3.7 ± 0.2a	3.4 ± 0.2a	5.9 ± 0.3d	3.8 ± 0.2a

*Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre los tratamientos para un día específico (p ≤ 0.05).

control negativo mostró un aumento significativo, alcanzando 5.9 mg/g al día 21, lo que refleja una mayor degradación de carbohidratos complejos en azúcares simples debido al deterioro. Estos resultados confirman la capacidad del aceite de *C. citratus* (DC.) Stapf para ralentizar la descomposición y mantener la calidad de las fresas durante el almacenamiento (Yan *et al.*, 2021).

d) Contenido de humedad

Las fresas tratadas con 1.5 y 2.0 % de aceite esencial mantuvieron niveles de humedad significativamente más altos en comparación con los tratamientos de 0.5 y 1.0 %, así como con el control negativo (Tabla 7). Al día 21 después del tratamiento, las fresas del control negativo perdieron una cantidad considerable de humedad, alcanzando un contenido promedio de 68 %, mientras que las fresas tratadas con 2.0 % de aceite esencial mantuvieron un 81 % de humedad.

Tal como se muestra en la Tabla 7, as fresas tratadas con 1.5 % y 2.0 % de aceite esencial conservaron niveles de hume-

dad más altos, mientras que el control negativo mostró una pérdida pronunciada, reflejando la deshidratación acelerada del fruto. Esto sugiere que el aceite esencial ayudó a reducir la pérdida de agua y preservar la calidad del fruto, mientras que las fresas del control negativo, con 68 % de humedad al final del período, experimentaron una deshidratación significativa, lo que podría estar asociado a una pérdida de firmeza y calidad sensorial (Moreno *et al.*, 2000).

e) Actividad antioxidante

La actividad antioxidante de las fresas tratadas se evaluó mediante la captura del radical DPPH, expresada como porcentaje de inhibición (Tabla 8). Los tratamientos con 1.5 y 2.0 % de aceite esencial mantuvieron una actividad antioxidante significativamente mayor (70.0 y 72.0 %), a lo largo de los 21 días en comparación con los tratamientos de 0.5 y 1 % (60.0 y 58.0 %), así como con el control negativo (45.0 %). En comparación, el control negativo experimentó una pérdida significativa de capacidad antioxidante, reflejando una mayor

Tabla 7. Contenido de humedad en fresas tratadas con aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf (Porcentaje de humedad).

Table 7. Moisture content in strawberries treated with *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil (Moisture percentage).

Día	T1: Aceite esencial 0.5 %	T2: Aceite esencial 1.0 %	T3: Aceite esencial 1.5 %	T4: Aceite esencial 2.0 %	Control negativo 0 %	Control positivo Microdyn 0.1 %
1	89.0 ± 0.5a	89.1 ± 0.5a	89.3 ± 0.5a	89.5 ± 0.5a	89.0 ± 0.5a	89.3 ± 0.5a
7	85.5 ± 0.6b	85.7 ± 0.6b	87.0 ± 0.5a	88.2 ± 0.5a	82.4 ± 0.6c	87.4 ± 0.5a
14	81.0 ± 0.7b	80.5 ± 0.7b	85.0 ± 0.5a	86.5 ± 0.5a	75.3 ± 0.7c	85.6 ± 0.5a
21	76.2 ± 0.8b	74.5 ± 0.8b	82.0 ± 0.5a	81.0 ± 0.5a	68.0 ± 0.8c	81.5 ± 0.5a

*Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre los tratamientos para un día específico (p ≤ 0.05).

Tabla 8. Actividad antioxidante en fresas tratadas con aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf (% inhibición de DPPH).**Table 8.** Antioxidant activity in strawberries treated with *C. citratus* (DC.) Stapf essential oil (% DPPH inhibition).

Día	T1: Aceite esencial 0.5 %	T2: Aceite esencial 1.0 %	T3: Aceite esencial 1.5 %	T4: Aceite esencial 2.0 %	Control negativo 0 %	Control positivo Microdyn 0.1 %
1	75.0 ± 0.5a	75.3 ± 0.5a	75.5 ± 0.5a	75.8 ± 0.5a	74.8 ± 0.5a	75.6 ± 0.5a
7	70.5 ± 0.6b	70.7 ± 0.6b	73.0 ± 0.5a	74.0 ± 0.5a	67.2 ± 0.6c	73.5 ± 0.5a
14	65.2 ± 0.7b	65.0 ± 0.7b	71.5 ± 0.5a	73.0 ± 0.5a	59.8 ± 0.7c	71.8 ± 0.5a
21	60.0 ± 0.8b	58.0 ± 0.8b	70.0 ± 0.5a	72.0 ± 0.5a	45.0 ± 0.8c	70.5 ± 0.5a

*Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre los tratamientos para un día específico ($p \leq 0.05$).

oxidación y degradación de los compuestos fenólicos. Estos resultados sugieren que el aceite esencial no solo conserva la frescura del fruto, sino que también protege sus propiedades antioxidantes, mejorando así su valor nutricional durante el almacenamiento (Toazza *et al.*, 2021).

Análisis de componentes principales

El ACP permitió identificar patrones de variación y establecer las relaciones entre los diferentes tratamientos y los parámetros evaluados (Figura 2). Los resultados mostraron que los tratamientos T3 y T4 con 1.5 y 2.0 % de aceite esencial correspondientemente, presentaron una alta correlación con las variables de calidad, tales como firmeza, contenido de humedad y actividad antioxidante. Estos resultados refuerzan la eficacia de las concentraciones más altas de aceite esencial de *C. citratus* en la conservación postcosecha de las fresas. En contraste, los tratamientos con concentraciones menores (T1: 0.5 % y T2: 1.0 %) y el control negativo se agruparon, evidenciando una correlación menos favorable con los parámetros de calidad. Específicamente, se observó un aumento en los sólidos solubles totales y los azúcares reductores, indicadores de una maduración acelerada y mayor descomposición de los frutos.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que demuestran que los aceites esenciales ricos en compuestos bioactivos, como el citral, tienen un efecto positivo en la preservación de frutas frescas al inhibir la actividad microbiana y ralentizar los procesos oxidativos (Sonker *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2021). La alta concentración de citral, en combinación con otros compuestos como geraniol y limoneno, presentes en el aceite de *C. citratus*, podría explicar la capacidad de los tratamientos T3 y T4 para mantener la integridad estructural

de las fresas y conservar su calidad nutricional durante el almacenamiento prolongado. Por otro lado, el ACP también sugiere que el control positivo con Microdyn presenta un comportamiento similar al tratamiento con 2.0 % de aceite esencial, lo cual subraya el potencial del aceite de *C. citratus* como una alternativa natural a los conservantes sintéticos, siendo esto de importancia para la industria alimentaria, ya que representa una opción sostenible y segura que responde a la creciente demanda de métodos de conservación libres de químicos.

Los hallazgos sugieren que estos tratamientos podrían ser evaluados en diferentes presentaciones, considerando que una mayor densidad de frutos incrementa el calor desprendido, la humedad relativa y el riesgo de contaminación, así como la evaluación de contenedores comerciales.

CONCLUSIONES

El uso de aceite esencial de *C. citratus* (DC.) Stapf en concentraciones de 1.5 y 2.0 % se presenta como una alternativa natural y eficaz para prolongar la vida de anaquel de fresas, manteniendo parámetros clave de calidad como la firmeza, el contenido de humedad, la actividad antioxidante, los sólidos solubles totales (SST) y la concentración de azúcares reductores. Los tratamientos con concentraciones más altas del aceite esencial resultaron comparables a los conservantes comerciales, lo que refuerza su potencial como conservante natural. Además, el tratamiento con 1.5 y 2.0 % ayudó a reducir la deshidratación del fruto, manteniendo niveles de humedad elevados y retrasando el incremento de SST y azúcares, lo que contribuye a una menor descomposición y mejor conservación visual y microbiológica de las fresas. El análisis de componentes principales (ACP) confirmó que T3 y T4 se correlacionan positivamente con los parámetros de calidad evaluados, mostrando un comportamiento similar al control positivo (Microdyn 0.1 %). Esto subraya el potencial del aceite esencial de *C. citratus* como una alternativa viable a los conservantes sintéticos, al ofrecer una solución sostenible y libre de químicos sintéticos para la industria alimentaria.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto apoyado por el Gobierno del Estado de Hidalgo a través del Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo (CITNOVA).

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

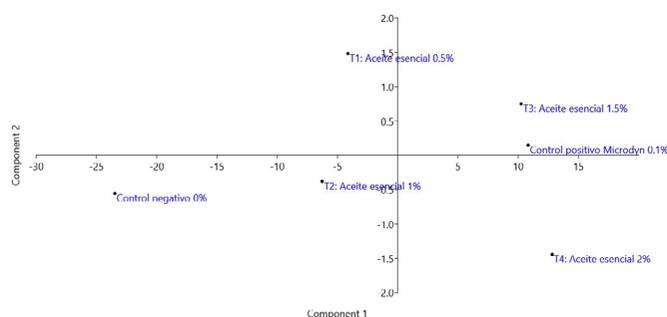


Figura 2. Análisis de componentes principales de los tratamientos y controles en la calidad de postcosecha de fresa.

Figure 2. Principal component analysis of treatments and controls on the postharvest quality of strawberries.

REFERENCIAS

- Athayde, A., Oliveira, P., Guerra, I., Conceição, M., Lima, M., Arcanjo, N., Madruga, M., Berger, L. y Souza, E. 2016. A coating composed of chitosan and *Cymbopogon citratus* (Dc. Ex Nees) essential oil to control *Rhizopus* soft rot and quality in tomato fruit stored at room temperature. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 91, 582-591. <https://doi.org/10.1080/14620316.2016.1193428>.
- Bhat, R., y Stamminger, R. 2016. Impact of combination treatments of modified atmosphere packaging and refrigeration on the status of antioxidants in highly perishable strawberries. *Journal of Food Process Engineering*, 39, 121-131. <https://doi.org/10.1111/JFPE.12205>.
- De Sousa, D.P., Damasceno, R.O.S., Amorati, R., Elshabrawy, H.A., de Castro, R.D., Bezerra, D.P. y Lima, T.C. 2023. Essential oils: Chemistry and pharmacological activities. *Biomolecules*, 13(7), 1144. <https://doi.org/10.3390/biom13071144>
- Domínguez, P.A., Rodríguez, R., Capulín, J., Razo, R. y Díaz, M.A. 2017. Influencia de factores edáficos en el crecimiento de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Santiago de Anaya, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 23(2), 145-154.
- Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J.M., Quiles, J.L., Mezzetti, B. y Battino, M. 2012. The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. *Nutrition*, 28(1), 9-19. doi:10.1016/j.nut.2011.08.009.
- Hoseini, S., Amini, J., Rafei, J. y Khorshidi, J. 2019. Inhibitory effect of some plant essential oils against strawberry anthracnose caused by *Colletotrichum nymphaeae* under *in vitro* and *in vivo* conditions. *European Journal of Plant Pathology*, 155, 1287-1302. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01856-2>.
- Jalali, A., Linke, M., Geyer, M., y Mahajan, P. 2020. Shelf life prediction model for strawberry based on respiration and transpiration processes. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100525>.
- Kargwal, R., Garg, M.K., Singh, V.K., Garg, R. y Kumar, N. 2020. Principles of modified atmosphere packaging for shelf life extension of fruits and vegetables: An overview of storage conditions. *IJCS*, 8(3), 2245-2252. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3af.9545>
- Krishnaveni, K., Sabitha, M., Murugan, M., Kandeepan, C., Ramya, S., Loganathan, T. y Jayakumararaj, R. 2022. vNN model cross validation towards accuracy, sensitivity, specificity and kappa performance measures of β -caryophyllene using a restricted-unrestricted applicability domain on Artificial Intelligence & Machine Learning approach based in-silico prediction. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 12:1-S. <https://doi.org/10.22270/jddt.v12i1-s.5222>.
- Liu, S., Shao, X., Wei, Y., Li, Y., Xu, F. y Wang, H. 2016. *Solidago canadensis* L. essential oil vapor effectively inhibits *Botrytis cinerea* growth and preserves postharvest quality of strawberry as a food model system. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01179>.
- Madi, Y., Choucry, M., Meselhy, M. y El-Kashoury, E. 2020. Essential oil of *Cymbopogon citratus* cultivated in Egypt: seasonal variation in chemical composition and anticholinesterase activity. *Natural Product Research*, 35, 4063- 067. <https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1713125>.
- Moreno, J., Chiralt, A., Escriche, I. y Serra, J. 2000. Effect of blanching/osmotic dehydration combined methods on quality and stability of minimally processed strawberries. *Food Research International*, 33, 609-616. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00097-1).
- Neri, F., Cappellin, L., Spadoni, A., Cameldi, I., Alarcón, A., Aprea, E., Romano, A., Gasperi, F. y Biasioli, F. 2015. Role of strawberry volatile organic compounds in the development of *Botrytis cinerea* infection. *Plant Pathology*, 64, 709-717. <https://doi.org/10.1111/PPA.12287>.
- Okpo, S.O. y Edeh, I. 2023. A comprehensive review on lemongrass (*Cymbopogon Citratus*) oil extraction and its applications. *EPRA International Journal of Research and Development (IJRD)*, 8(4), 258-273. <https://doi.org/10.36713/epra12959>
- Oliveira, P., Oliveira, K., Vieira, W., Câmara, M. y Souza, E. 2018. Control of anthracnose caused by *Colletotrichum* species in guava, mango and papaya using synergistic combinations of chitosan and *Cymbopogon citratus* (D.C. ex Nees) Stapf. essential oil. *International Journal of Food Microbiology*, 266, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.11.018>.
- Sahal, G., Woerdenbag, H., Hinrichs, W., Visser, A., Tepper, P., Quax, W., Mei, H. y Bilkay, I. 2020. Antifungal and biofilm inhibitory effect of *Cymbopogon citratus* (lemongrass) essential oil on biofilm forming by *Candida tropicalis* isolates; an *in vitro* study. *Journal of Ethnopharmacology*, 112188. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112188>.
- Salariá, D., Rolta, R., Sharma, N., Patel, C., Ghosh, A., Dev, K., Sourirajan, A. y Kumar, P. 2021. *In vitro* and *in silico* antioxidant and anti-inflammatory potential of essential oil of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf of North-Western Himalaya. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 40, 14131-14145. <https://doi.org/10.1080/07391102.2021.2001371>.
- Santín, M., Santos, A., Nakamura, C., Filho, B., Ferreira, I. y Ueda-Nakamura, T. 2009. *In vitro* activity of the essential oil of *Cymbopogon citratus* and its major component (citral) on *Leishmania amazonensis*. *Parasitology Research*, 105, 1489-1496. <https://doi.org/10.1007/s00436-009-1578-7>.
- Sharma, R.R., Singh, D. y Singh, R. 2009. Biological control of postharvest diseases of fruits and vegetables by microbial antagonists: A review. *Biological Control*, 50(3), 205-221. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.05.001>
- Shehata, S.A., Abdeldaym, E.A., Ali, M.R., Mohamed, R.M., Bob, R.I. y Abdelgawad, K.F. 2020. Effect of some citrus essential oils on post-harvest shelf life and physicochemical quality of strawberries during cold storage. *Agronomy*, 10(10), 1466. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101466>
- Sonker, N., Pandey, A., Singh, P., y Tripathi, N. 2014. Assessment of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf essential oil as herbal preservatives based on antifungal, antiaflatoxin, and antiochratoxin activities and *in vivo* efficacy during storage. *Journal of Food Science*, 79 4, M628-34. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12390>.
- Toazza, C., Marques, C., Amaral, W. y Masson, M. 2021. Comparative study of *Elyonurus muticus* and *Cymbopogon* essential oils: potential as food preservative and surface coating of strawberries. *Journal of Essential Oil Research*, 33, 359 - 368. <https://doi.org/10.1080/10412905.2021.1895336>.
- Torres, W.M., dos Santos Silva, F. y Albuquerque, U.P. 2018. *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. medicinal and aromatic plants of South America: Brazil, 183-196. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1552-0_16
- Trejo, V., Trejo, M.A., Pascual, S. y Lira, A.A. 2015. Extracción de aceite esencial de eucalipto y su aplicación en la conservación de frambuesas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2), 228-233.

- Vicente, A., Costa, M., Martínez, G., Chaves, A. y Civello, P. 2005. Effect of heat treatments on cell wall degradation and softening in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 38, 213-222. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2005.06.005>.
- Vyshali, P., Saraswathi, K. y Mallavarapu, G. 2015. Chemical composition of the essential oils of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf grown in three locations in south India. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 18, 230-235. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.935075>.
- Wang, W., Hu, W., Ding, T., Ye, X. y Liu, D. 2018. Shelf-life prediction of strawberry at different temperatures during storage using kinetic analysis and model development. *Journal of Food Process and Preservation*, 42(8), e13693. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13693>
- Woodward, J. 1972. Physical and chemical changes in developing strawberry fruits. *Journal of the Science of food and agriculture*, 23 4, 465-73. <https://doi.org/10.1002/JJFA.2740230406>.
- Yan, J., Wu, H., Chen, K., Feng, J. y Zhang, Y. 2021. Antifungal activities and mode of action of *Cymbopogon citratus*, *Thymus vulgraris*, and *Origanum heracleoticum* essential oil vapors against *Botrytis cinerea* and their potential application to control postharvest strawberry gray mold. *Foods*, 10. <https://doi.org/10.3390/foods10102451>.
- Zaman, F., Jaffel, K. y Abdelmageed, A. 2022. The effects of post-harvest drying period on the yield and chemical composition of leaf essential oil from *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 25, 571 - 580. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2084349>.