

Nanopartículas de plata en la calidad de la fresa

Disraeli Eron Moreno-Guerrero¹

Catalino Jorge López-Collado^{1,§}

Santos Gerardo Leyva-Mir²

Sergio Humberto Chávez-Franco³

Alejandro Alonso-López¹

Diego Esteban Platas-Rosado¹

1 Colegio de Postgraduados-Campus Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz km 88.5, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México. CP. 91690. (moreno.disraeli@colpos.mx; dplatas@colpos.mx).

2 Departamento de Parasitología Agrícola-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México- Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (leyvimir13@gmail.com).

3 Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera Federal México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. (sergiocf@colpos.mx).

Autor para correspondencia: ljorge@colpos.mx.

Resumen

Las nanopartículas de plata al ser bioestimulantes inorgánicos en el cultivo de fresa pueden fungir como compuestos conservadores de alimentos. La presente investigación se efectuó con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de plata vía foliar y vía raíz a dosis crecientes en la calidad de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivar Festival. El experimento se estableció en invernadero en el campo agrícola experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, en los años 2022 y 2023 (latitud 19.4661, longitud -98.8538). Como material vegetal se utilizaron plantas de fresa cultivar Festival que se colocaron en un sistema hidropónico abierto. Se aplicaron vía foliar y vía raíz los tratamientos de 0, 40, 80, 120, 160 y 0, 5, 10, 15, 20 mg L⁻¹ nanopartículas de plata respectivamente. A los 70 días después del inicio de tratamientos se determinó peso fresco, firmeza, pH, grados brix, colorimetría, vitamina C, proteínas solubles totales, fenoles totales y antocianinas. Los resultados mostraron que, el efecto de la aplicación vía foliar de nanopartículas de plata aumentó el peso fresco, firmeza, pH, grados brix, colorimetría, fenoles totales y antocianinas y el efecto de la aplicación vía raíz de nanopartículas de plata incrementó firmeza, pH, grados brix, colorimetría, vitamina C, proteínas solubles totales, fenoles totales y antocianinas. De manera concluyente, los efectos de las aplicaciones de nanopartículas de plata vía foliar y vía raíz acrecentaron los indicadores de calidad de frutos de fresa cultivar Festival siendo las nanopartículas de plata una alternativa viable en la soberanía alimentaria de México.

Palabras clave:

Fragaria x ananassa Duch., conservación, indicadores, nanotecnología.

Introducción

La nanotecnología es una tecnología, ciencia e ingeniería que destaca por que la nanociencia es el estudio de estructuras en escalas de nanómetros que van entre 1 y 100 nm y la nanotecnología utiliza a esta en aplicaciones prácticas, innovadoras y prometedoras en diversas ciencias como la agricultura. A nivel mundial, la producción de nanopartículas metálicas está incrementándose, siendo estas un factor de productividad en plantas superiores de interés alimenticio debido a la mejora de los procesos bioquímicos, fisiológicos y agronómicos (Phogat *et al.*, 2018).

Las nanopartículas de plata (NPsAg) tienen la capacidad de mejorar los indicadores de calidad de distintos frutos debido a que, se comportan como bioestimulantes inorgánicos mejorando en las plantas la eficiencia nutrimental, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad del cultivo.

Para obtener un efecto positivo de las NPsAg en el desarrollo de plantas superiores y en consecuencia, en los indicadores de calidad de frutos deben ocurrir los procesos de acceso, absorción, translocación y la asimilación de las NPsAg en función de su concentración, dimensión y recubrimiento (Wang *et al.*, 2023). Por otra parte, los compuestos bioactivos presentes en frutos como las fresas son importantes porque generan un alimento funcional para los seres humanos.

Entre los compuestos bioactivos destacan los flavonoides donde se encuentran las antocianinas y flavonoles, seguidos de los taninos hidrolizables donde se localizan los elagitaninos y galotaninos y finalmente, los ácidos fenólicos donde están los ácidos hidroxibenzoicos y ácidos hidroxicinámicos. Los compuestos bioactivos tienden a incrementar su contenido en frutos de fresa por la activación por parte de las NPsAg de la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL) (Shahzad *et al.*, 2024).

En México para el año 2022, la superficie destinada a la producción de fresa fue de 12 913 ha; es decir, aproximadamente el 1% de la superficie nacional con una producción de 578 141 t (SIAP, 2024) denotando que, es muy importante incrementar la producción y la calidad de este cultivo. Finalmente, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz a dosis crecientes en la calidad de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivar Festival.

Materiales y métodos

Selección del sitio de estudio

El experimento se realizó en el campo agrícola experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, desde agosto del año 2022 hasta junio del año 2023 que está ubicado en 19.4661° de latitud norte y -98.8538° de longitud oeste a una altitud de 2250 m. La determinación de los indicadores de calidad se efectuó en el Laboratorio de Usos Múltiples de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, desde enero a julio del año 2024 que está ubicado en 19.3614° de latitud norte y -98.8867° de longitud oeste a una altitud de 2 250 m.

Obtención de Nanopartículas de plata

Se utilizó la formulación comercial Bionag Argovit™ de NPsAg, que contiene 12 mg ml⁻¹ de plata metálica y 188 mg ml⁻¹ de polivinilpirrolidona (PVP) de 15-30 kD en agua, un contenido promedio de 20% NPsAg (200 mg ml⁻¹ NPsAg) con un diámetro promedio hidrodinámico de la plata metálica con PVP de 70 nm (Juárez-Moreno *et al.*, 2016).

Obtención del material vegetal

Se emplearon plantas de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivar Festival.

Manejo del experimento

Se emplearon bolsas de polietileno de 30 x 30 cm donde se utilizó como sustrato tezontle con una granulometría de 4 mm. La nutrición de las plantas se realizó en base a la solución nutritiva universal de Steiner, la cual en forma completa está constituida por (en mol m⁻³) 12 de NO₃⁻, 1 de H₂PO₄⁻, 7 de SO₄⁻², 7 de K⁺, 9 de Ca⁺² y 4 de Mg⁺². Se realizó el proceso de establecimiento de sistemas de riego por goteo para proseguir con el trasplante de plantas de fresa cultivar Festival.

La distancia entre las plantas fue de 30 cm y entre bloques de 1 m. Las plantas de fresa se irrigaron en un intervalo de 2 a 3 veces por día a lo largo del ciclo biológico del cultivo de fresa.

Aplicación de nanopartículas de plata

Para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata vía foliar y para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata vía raíz se utilizaron distintas plantas para proceder a realizar cinco tratamientos en cada uno que fueron aplicar concentraciones de 0, 40, 80, 120, 160 mg ml⁻¹ y 0, 5, 10 15, 20 mg ml⁻¹ de NPsAg respectivamente, realizando la aplicación en eight intervalos diferentes; es decir, a los 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 y 56 días después del trasplante. Las aplicaciones se realizaron en las primeras horas del día cuando existía una humedad relativa mayor a 60% y temperaturas menores a 18 °C en un intervalo de tiempo de 1 a 3 min planta⁻¹.

Medición de las características del fruto

Tanto para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata vía foliar como para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata vía raíz se seleccionaron al azar 25 plantas de cada experimento destacando que, cada experimento estuvo conformado por 100 unidades experimentales dando un total de 200 unidades experimentales por los dos experimentos.

De las 25 plantas seleccionadas se realizó la marcación de cinco plantas por cada tratamiento realizado. A los 70 días después de la primera aplicación de NPsAg, se cosechó con el criterio de índice de madurez de que los frutos tuvieran un mínimo de 50% su superficie con coloración roja tenue o rosa para la determinación de los indicadores de calidad.

Evaluación de los indicadores de calidad

Los indicadores de calidad evaluados en los frutos de las fresas fueron: peso fresco de fruto (g) con una báscula Ohaus Explorer® modelo H-4738-China, firmeza (kilogramo fuerza) con un medidor de fuerza mecánica Chatillon® modelo MT500-China, pH con un potenciómetro Conductronic® modelo PC45-USA, grados brix (%) con un refractómetro Atago® modelo PAL-1 3810-Japón, colorimetría (luminosidad, ángulo de tono HUE e índice de saturación Chroma) con un colorímetro General Colorimeter MeterTo® modelo JZ-300-China.

La vitamina C en miligramos por gramo por peso de materia fresa (mg g⁻¹ PMF) mediante la técnica descrita por Roe y Kuether (1943), proteínas solubles totales (mg g⁻¹ PMF) a través de la técnica descrita por Bradford (1976), fenoles totales (mg g⁻¹ PMF) mediante la técnica descrita por Singleton y Rossi (1965) y antocianinas (mg C3GE g⁻¹ de PMF) a través de la técnica descrita por Abdel y Hucl (1999) destacando que, para cada indicador de calidad se seleccionaron 15 frutos por tratamiento y cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones por bloque tanto para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata vía foliar como vía raíz.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar (Dbca), estableciendo cinco bloques con cinco tratamientos donde se ensayó cada tratamiento cuatro veces tanto para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata vía foliar como para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata vía raíz donde, las respectivas aplicaciones se realizaron de forma independiente una de la otra, dando un total de 100 unidades experimentales por

experimento y 200 unidades experimentales por los dos experimentos. La unidad experimental fue una bolsa de polietileno negro 30 x 30 cm conteniendo una planta de fresa cultivar festival.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05, utilizando el paquete estadístico Sas 9.4.

Resultados y discusión

El efecto de la aplicación vía foliar y vía raíz de nanopartículas de plata influyó notablemente en los indicadores de calidad medidos en fresa cultivar festival destacando que, en el indicador de calidad de colorimetría se determinó luminosidad, ángulo de tono HUE e índice de saturación (Chroma), todo ello, como se observa en el Cuadro 1, 2, 3 y 4.

Cuadro 1. Indicadores de calidad de peso fresco (g), firmeza (kilogramo fuerza), pH, grados brix (%), luminosidad y ángulo de tono HUE de fresa cultivar Festival, asperjadas con 0, 40, 80, 120 y 160 mg L⁻¹ NPsAg Bionag ArgovitTM, a 70 días después del inicio de tratamientos vía foliar.

Tto. de NPsAg (mg L ⁻¹)	Peso fresco (g)	Firmeza (kilogramo-fuerza)	pH	Grados Brix (%)	Luminosidad	Ángulo de tono HUE
0	15.88 ±1.29b	0.392 ±0.021d	3.63 ±0.014e	5.17 ±0.27b	27.01 ±0.49d	27.08 ±1.25c
40	19.73 ±1.65a	0.51533 ±0.049c	3.75 ±0.015d	6.22 ±0.61a	30.69 ±0.31c	31.61 ±0.85b
80	17.97 ±1.71ab	0.87933 ±0.044a	3.84 ±0.017c	5.64 ±0.58a	33.06 ±0.23b	32.29 ±0.91b
120	18.23 ±1.51ab	0.64133 ±0.016b	4.11 ±0.054a	6.03 ±0.49a	34.14 ±0.29b	32.04 ±1b
160	17 ±1.71b	0.54733 ±0.01c	3.92 ±0.011b	6.15 ±0.59a	37.23 ±1.18a	36.73 ±2.8a

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). NPsAg= nanopartículas de plata.

Cuadro 2. Indicadores de calidad de índice de saturación (CRHOMA), vitamina C (mg g⁻¹ PMF), proteínas solubles totales (mg g⁻¹ PMF), fenoles totales (mg g⁻¹ PMF) y antocianinas (mg C3GE g⁻¹ de PMF) de fresa cultivar Festival, asperjadas con 0, 40, 80, 120 y 160 mg L⁻¹ NPsAg Bionag ArgovitTM, a 70 días después del inicio de tratamientos vía foliar.

Tto. de NPsAg (mg L ⁻¹)	Índice de saturación (Crhoma)	Vitamina C (mg g ⁻¹ PMF)	Proteínas solubles totales (mg g ⁻¹ PMF)	Fenoles totales (mg g ⁻¹ PMF)	Antocianinas (mg C3GE g ⁻¹ PMF)
0	16.69 ±0.85e	0.651 ±0.22a	2.77 ±0.28a	1.37 ±0.12d	0.154 ±0.02d
40	22.25 ±0.47d	0.6512 ±0.23a	2.78 ±0.29a	1.53 ±0.21b	0.1757 ±0.04c
80	26.05 ±0.45c	0.6518 ±0.28a	2.78 ±0.52a	1.45 ±0.1c	0.1974 ±0.02b
120	29.88 ±0.94b	0.6513 ±0.17a	2.78 ±0.51a	1.92 ±0.11a	0.2083 ±0.02ab
160	35.84 ±1.52a	0.6516 ±0.25a	2.78 ±0.45a	1.47 ±0.16c	0.2167 ±0.04a

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). NPsAg= nanopartículas de plata.



Cuadro 3. Indicadores de calidad de peso fresco (g), firmeza (kilogramo-fuerza), pH, grados brix (%), luminosidad y ángulo de tono HUE de fresa cultivar Festival, asperjadas con 0, 5, 10, 15 y 20 mg L⁻¹ NPsAg Bionag Argovit™, a 70 días después del inicio de tratamientos vía raíz.

Tto. de NPsAg (mg L ⁻¹)	Peso fresco (g)	Firmeza (kilogramo- fuerza)	pH	Grados Brix (%)	Luminosidad	Ángulo de tono HUE
0	17.85 ±2.43a	0.40466 ±0.026e	3.68 ±0.021d	5.18 ±0.07c	27.61 ±0.47d	27.1 ±1c
5	18.7 ±1.77a	0.63733 ±0.012b	3.84 ±0.016c	5.88 ±0.59b	31.27 ±0.58c	31.22 ±0.58b
10	19.97 ±1.86a	0.76266 ±0.044a	3.82 ±0.022c	5.86 ±0.45b	31.63 ±0.43bc	31.18 ±1.08b
15	18.47 ±1.75a	0.56733 ±0.013c	3.97 ±0.016b	6.56 ±0.52a	36.36 ±1.06a	36.99 ±2.31a
20	19.71 ±2.24a	0.494 ±0.011d	4.21 ±0.092a	6.67 ±0.43a	32.87 ±0.33b	33.55 ±0.82b

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$).
NPsAg= nanopartículas de plata.

Cuadro 4. Indicadores de calidad de índice de saturación (Crhoma), vitamina C (mg g⁻¹ PMF), proteínas solubles totales (mg g⁻¹ PMF), fenoles totales (mg g⁻¹ PMF) y antocianinas (mg C3GE g⁻¹ de PMF) de fresa cultivar Festival, asperjadas con 0, 5, 10, 15 y 20 mg L⁻¹ NPsAg Bionag Argovit™, a 70 días después del inicio de tratamientos vía raíz.

Tto. de NPsAg (mg L ⁻¹)	Índice de saturación (Crhoma)	Vitamina C (mg g ⁻¹ PMF)	Proteínas solubles totales (mg g ⁻¹ PMF)	Fenoles totales (mg g ⁻¹ PMF)	Antocianinas (mg C3GE g ⁻¹ de PMF)
0	15.9 ±0.68e	0.6501 ±0.27c	2.76 ±0.27c	1.28 ±0.11d	0.1888 ±0.02d
5	21.55 ±0.41d	0.6521 ±0.32b	2.79 ±0.68ab	1.53 ±0.22b	0.2114 ±0.02c
10	25.77 ±0.43c	0.6512 ±0.31bc	2.8 ±0.76a	1.44 ±0.13c	0.2032 ±0.02c
15	36.29 ±1.76a	0.6525 ±0.36ab	2.78 ±0.54b	1.92 ±0.11a	0.2411 ±0.02b
20	29.24 ±0.52b	0.6536 ±0.4a	2.79 ±0.54ab	1.45 ±0.16bc	0.2587 ±0.04a

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$);
NPsAg= nanopartículas de plata.

Peso fresco (g)

El peso fresco del fruto (g) de fresa a través de la aplicación de NPsAg vía foliar mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El tratamiento que obtuvo mayor peso fresco de fruto (g) (19.73) se alcanzó con plantas suministradas con 40 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar (Tabla 1). Por otro lado, el peso fresco de fruto (g) de fresa mediante la aplicación de NPsAg vía raíz no mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tabla 3).

Estudios desarrollados por Shahzad et al. (2024) en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) encontró que, aplicaciones de nanopartículas de plata en cantidades de 50 mg L⁻¹ incrementaron el peso fresco de fruto recalando que, las NPsAg actúan mediante el bloqueo de la señalización de etileno retrasando la senescencia y optimizando procesos metabólicos.

Firmeza (kilogramo-fuerza)

La firmeza de fruto (kilogramo-fuerza) de fresa mediante la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que tuvieron mayor firmeza en fruto (kilogramo-fuerza) (0.8793) (0.7626) se alcanzaron con plantas suministradas con 80 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 10 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz respectivamente (Cuadro 1 y 3).

De acuerdo con Elatafi y Fang (2022) en uva (*Vitis vinifera*) halló que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 100 mg L⁻¹ aumentaron la firmeza destacando que, los iones de plata (Ag⁺) NPsAg inhiben la formación del ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico, que, a su vez, inhiben la formación de la hormona de crecimiento etileno que inhibe el proceso de madurez y así también, se inhibe la degradación de la protopectina en pectina.

pH

El pH del fruto de la fresa a través de la aplicación de NPsAg por vía foliar y por vía de la raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que obtuvieron mayor pH en fruto (4.10) (4.21) se alcanzaron con plantas suministradas con 120 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 20 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz respectivamente (Cuadro 1 y 3).

Por su parte Vishal *et al.* (2023) en fresa descubrió que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 2 000 mg L⁻¹ acrecentaron el pH mencionando que, las NPsAg sufren procesos de cristalización que generan una bioestimulación para la conversión de ácidos orgánicos en azúcares eficientizando reacciones enzimáticas de la respiración que reducen la acidez y resulta en un aumento del pH de fruto.

Grados Brix (%)

Los grados brix de fruto (%) de fresa mediante la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que tuvieron mayores grados brix (%) (6.22, 5.64, 6.03 y 6.15) (6.56 y 6.67) se alcanzaron con plantas suministradas con 40, 80, 120, y 160 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 15 y 20 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz respectivamente (Cuadro 1 y 3).

Trabajos como los de Barikloo y Ahmadi (2018) en fresa halló que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 3 500 mg L⁻¹ aumentaron los grados brix recalando que, las NPsAg actúan optimizando la transformación de carbohidratos a otros compuestos solubles a través de la bioestimulación de procesos metabólicos como la fotosíntesis resultando en la disminución del agua en el fruto, lo que provocó un aumento en la concentración de sólidos solubles.

Luminosidad

La luminosidad del fruto de la fresa a través de la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que tuvieron mayor luminosidad (37.23) (36.36) se alcanzaron con plantas suministradas con 160 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 15 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz respectivamente (Cuadro 1 y 3).

Otro estudio desarrollado por Sogvar *et al.* (2016) realizada en fresas encontró que, aplicaciones de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) en 3 000 mg L⁻¹ incrementaron la luminosidad destacando que, las NPsZnO actúan eficientizando la actividad enzimática que suprime la liberación del regulador de crecimiento etileno retrasando la senescencia.

Ángulo de tono HUE (coloración)

El ángulo de tono HUE en fruto de fresa que indica una coloración ya sea verde o rojiza mediante la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que tuvieron mayor ángulo de tono HUE (36.73) (36.99) se alcanzaron con plantas suministradas con 160 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 15 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz respectivamente (Tabla 1 y 3).

Al respecto Zhang *et al.* (2018) en su investigación en frutos de fresas descubrió que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 5 000 mg L⁻¹ incrementaron el ángulo de tono HUE destacando que, las NPsAg actúan en el pardeamiento enzimático mediante reacciones de compuestos polifenólicos con oxígeno catalizadas por el polifenol oxidasa endógena.



Índice de saturación (intensidad de coloración)

El índice de saturación (Chroma) en fruto de fresa que indica cuán puro, intenso o vivo es un color a través de la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que tuvieron mayor índice saturación (35.84)(36.29) se alcanzaron con plantas suministradas con 160 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 15 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz respectivamente (Cuadro 2 y 4).

De acuerdo con Taha et al. (2022) en su investigación sobre fresa coincidió con lo obtenido en la presente investigación a través de aplicaciones de nanopartículas de plata en 500 mg L⁻¹ aumentando el índice de saturación recalando que, las NPsAg modifican los componentes bioquímicos de flavonoides, antocianinas, xantofilas, carotenos y clorofilas.

Vitamina C (mg g⁻¹ PMF)

La vitamina C de fruto (mg g⁻¹ PMF) de fresa indispensable como un compuesto antioxidante mediante la aplicación de NPsAg vía foliar no mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Cuadro 2). Por otra parte, la vitamina C de fruto (mg g⁻¹ PMF) de fresa a través de la aplicación de NPsAg vía raíz mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El tratamiento que obtuvo mayor vitamina C de fruto (mg g⁻¹ PMF) (0.6536) se alcanzó con plantas suministradas con 20 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz (Cuadro 4).

Con base a lo que menciona Ali et al. (2020) realizada en níspero (*Eriobotrya japonica* Lindl.) encontró que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 0.03 mg L⁻¹ incrementaron la vitamina C coincidiendo con lo obtenido mediante la aplicación de nanopartículas de plata vía raíz destacando que, las NPsAg al actuar como un bioestimulante inorgánico disminuyen el estrés de tipo abiótico favoreciendo la producción de metabolitos primarios y secundarios que desencadenan mayor concentración de vitamina C.

Proteínas solubles totales (mg g⁻¹ PMF)

Las proteínas solubles totales de fruto (mg g⁻¹ PMF) de fresa importantes para mejorar las características organolépticas a través de la aplicación de NPsAg vía foliar no mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Cuadro 2). A su vez, las proteínas solubles totales de fruto (mg g⁻¹ PMF) de fresa mediante la aplicación de NPsAg vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos debido a que, la raíz es el órgano específico en plantas superiores para realizar los procesos de acceso y absorción.

El tratamiento que obtuvo mayores proteínas solubles totales de fruto (mg g⁻¹ PMF) (2.8) se alcanzó con plantas suministradas con 10 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz (Tabla 4). Girilal et al. (2018) en su estudio realizado en jitomate (*Solanum lycopersicum*) halló que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 100 mg L⁻¹ acrecentaron proteínas solubles totales mencionando que, las NPsAg actúan disminuyendo el estrés de tipo abiótico mediante enzimas antioxidantes como la catalasa, peroxidasa y superóxido dismutasa que protegen del daño causado por las especies reactivas de oxígeno eficientizando la síntesis de proteínas y en consecuencia aumentando su concentración en fruto.

Fenoles totales (mg g⁻¹ PMF)

Los fenoles totales en fruto (mg g⁻¹ PMF) de fresa indispensables como compuestos antioxidantes mediante la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que obtuvieron mayores fenoles totales en fruto (mg g⁻¹ PMF) (1.92) (1.92) se alcanzaron con plantas suministradas con 120 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 15 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz respectivamente (Cuadro 2 y 4).

Datos de Moazzami-Farida et al. (2020) en su trabajo sobre salvia (*Salvia officinalis*) descubrió que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 100 mg L⁻¹ incrementaron los fenoles totales recalando que, las NPsAg inducen positivamente la actividad de la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL) que cataliza la conversión del aminoácido fenilalanina en precursores de diversos compuestos fenólicos incrementando así su concentración en fruto.

Antocianinas (mg C3GE g⁻¹ de PMF)

Las antocianinas en fruto (mg C3GE g⁻¹ de PMF) de fresa importantes como compuestos antioxidantes y que benefician a las características organolépticas a través de la aplicación de NPsAg vía foliar y vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los tratamientos que obtuvieron mayores antocianinas en fruto (mg C3GE g⁻¹ de PMF) (0.2167) (0.2587) se alcanzaron con plantas suministradas con 160 mg L⁻¹ NPsAg vía foliar y 20 mg L⁻¹ NPsAg vía raíz (Cuadro 2 y 4).

Lo reportado por Abbasi y Jamei (2018) en su investigación sobre *Echium* (*Echium amoenum*) halló que, aplicaciones de nanopartículas de plata en 50 mg L⁻¹ acrecentaron las antocianinas mencionando que, las NPsAg activan un sistema de defensa no enzimático tipo fenólico incrementando con ello, la concentración de antocianinas en fruto ante la presencia de altas concentraciones de metales con el objetivo de contrarrestar los efectos de toxicidad.

Conclusiones

Mediante el análisis de los resultados, se mostró un efecto positivo de la aplicación de nanopartículas de plata en fresa cultivar Festival en los indicadores de calidad medidos al bioestimular procesos bioquímicos, fisiológicos y agronómicos que generaron un mecanismo de defensa de la planta y la producción de compuestos antioxidantes. Finalmente, se recomienda en el cultivo de fresa cultivar Festival la aplicación de las dosis de NPsAg de 80, 120, 160 mg L⁻¹ y 10, 15, 20 mg L⁻¹ vía foliar y vía raíz respectivamente, para lograr incrementar la calidad denotando con ello que, las nanopartículas de plata Bionag ArgovitTM son una alternativa viable como bioestimulante inorgánico en la producción agrícola en beneficio de la soberanía alimentaria de México.

Bibliografía

- 1 Abbasi, F. and Jamei, R. 2019. Effects of silver nanoparticles and silver nitrate on antioxidant responses in *Echium amoenum*. Russian Journal of Plant Physiology. 66(3):488-494. <https://doi.org/10.1134/s1021443719030026>.
- 2 Abdel-Aal, E. S. M. and Hucl, P. 1999. A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheat. Cereal Chemistry Journal. 76(3):350-354. <https://doi.org/10.1094/cchem.1999.76.3.350>.
- 3 Ali, M.; Ahmed, A.; Shah, S. W. A.; Mehmood, T. and Abbasi, K. S. 2020. Effect of silver nanoparticle coatings on physicochemical and nutraceutical properties of loquat during postharvest storage. Journal of Food Processing and Preservation. 44(10):14808-14816. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14808>.
- 4 Barikloo, H. and Ahmadi, E. 2018. Effect of nanocomposite-based packaging and chitosan coating on the physical, chemical, and mechanical traits of strawberry during storage. Journal of Food Measurement and Characterization. 12(3):1795-1817. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9795-3>
- 5 Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry. 72(1-2):248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).
- 6 Elatafi, E. and Fang, J. 2022. Effect of silver nitrate (AgNO₃) and nano-silver (Ag-NPs) on physiological characteristics of grapes and quality during storage period. Horticulturae. 8(5):419-436. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050419>.
- 7 Girilal, M.; Fayaz, A. M.; Elumalai, L. K.; Sathiyaseelan, A.; Gandhiappan, J. and Kalaichelvan, P. T. 2018. Comparative stress physiology analysis of biologically and chemically

- synthesized silver nanoparticles on *Solanum lycopersicum* L. Colloid and Interface Science Communications. 24:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2018.02.005>.
- 8 Juárez-Moreno, K.; González, E. B.; Girón-Vázquez, N.; Chávez-Santoscoy, R.; Mota-Morales, J. and Pérez-Mozqueda, L. 2016. Comparison of cytotoxicity and genotoxicity effects of silver nanoparticles on human cervix and breast cancer cell lines. Human & Experimental Toxicology. 36(9):931-948. <https://doi.org/10.1177/0960327116675206>.
- 9 Moazzami-Farida, S. H.; Karamian, R. and Albrectsen, B. R. 2020. Silver nanoparticle pollutants activate oxidative stress responses and rosmarinic acid accumulation in sage. Physiologia Plantarum. 1(2020):1-18. <https://doi.org/10.1111/ppl.13172>.
- 10 Phogat, N.; Kohl, M. and Uddin, I. 2018. Interaction of nanoparticles with biomolecules, protein, enzymes, and its applications. Precision medicine. 11(2018):253-276. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805364-5.00011-1>.
- 11 Roe, J. H. and Kuether, C. A. 1943. The determination of ascorbic acid in whole blood and urine through the 24-dinitrophenylhydrazine derivative of dehydroascorbic acid. Journal of Biological Chemistry. 147(2):399-407. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)72395-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)72395-8).
- 12 SIAP. 2024. Servicio De Información Agroalimentaria y Pesquera. Avance de siembras y cosechas resumen nacional. <https://nube.siap.gob.mx/avance-agricola/>.
- 13 Shahzad, U.; Saqib, M.; Jhazab, H. M.; Abou Fayssal, S.; Ahmad, R. and Qayyum, A. 2024. Different concentrations of silver nanoparticles trigger growth, yield and quality of strawberry (*Fragaria ananassa* L.) fruits. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 187(5):668-677. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300284>.
- 14 Singleton, V. L. and Rossi, J. A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture. 16(3):144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>.
- 15 Sogvar, O. B.; Koushesh-Saba, M.; Emamifar, A. and Hallaj, R. 2016. Influence of nano-ZnO on microbial growth, bioactive content and postharvest quality of strawberries during storage. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 35(2016):168-176. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.005>.
- 16 Taha, I.; Zaghlool, A.; Nasr, A.; Nagib, A.; El-Azab, I.; Mersal, G. A. M.; Ibrahim, M. M. and Fahmy, A. 2022. Impact of starch coating embedded with silver nanoparticles on strawberry storage time. Polymers. 14(7):1439-1455. <https://doi.org/10.3390/polym14071439>.
- 17 Vishal, S.; Gopi, V.; Madhumitha, B.; Anitha, M.; Francis, N.; Ranchana, P.; Karthikeyan, P.; Suresh, V. and Kumar, D. 2023. Association analysis for biochemical and physiological characters in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) Coated with silver nitrate and silver nanoparticles. Biological Forum-An International Journal. 15(5):517-519.
- 18 Wang, X.; Xie, H.; Wang, P. and Yin, H. 2023. Nanoparticles in plants: uptake, transport and physiological activity in leaf and root. Materials. 16(8):3097-3118. <https://doi.org/10.3390/ma16083097>.
- 19 Zhang, C.; Li, W.; Zhu, B.; Chen, H.; Chi, H.; Lin, L.; Qin, Y. and Xue, J. 2018. The quality evaluation of postharvest strawberries stored in nano-ag packages at refrigeration temperature. Polymers. 10(8):894-911. <https://doi.org/10.3390/polym10080894>.



Nanopartículas de plata en la calidad de la fresa

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 May 2025
Date accepted: 01 August 2025
Publication date: 23 September 2025
Publication date: Aug-Sep 2025
Volume: 16
Issue: 6
Electronic Location Identifier: e3808
DOI: 10.29312/remexca.v16i6.3808

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

Fragaria x ananassa Duch.
conservación
indicadores
nanotecnología.

Counts

Figures: 0

Tables: 4

Equations: 0

References: 19

Pages: 0