



Trabajo Fin de Grado en

Ciencia y Tecnología de los alimentos

Revisión bibliográfica sobre las actuales estrategias de maduración de fruta en poscosecha

Literature review on current post-harvest fruit ripening strategies.

Autor/es

César Torijano González

Director/es

Esther Arias

Facultad de Veterinaria

2023-2024

ÍNDICE

1. Resumen	2
Abstract	3
2. Introducción	3
2.1 Frutas climatéricas y no climatéricas	4
2.2 Compuestos implicados en las reacciones bioquímicas de maduración y senescencia de frutas	5
2.2.1 El etileno: la hormona de la maduración	5
2.2.2 Óxido nítrico: regulador de importantes procesos fisiológicos asociados a la maduración y senescencia	6
2.3 Tecnologías poscosecha convencionales asociadas al control de la maduración y senescencia de frutas	7
2.3.1. Aplicación exógena de etileno	7
2.3.2. Tratamientos con ethephon	8
2.3.3 Aplicación de óxido nítrico para prolongar la vida útil poscosecha	8
2.4 Avances tecnológicos y nuevos retos en el estudio de los parámetros implicados en la maduración de frutas	10
3. Justificación y objetivos	10
4. Metodología	11
5. Resultados y discusión	13
5.1 Métodos convencionales para la maduración controlada de frutas	25
5.2 Aplicación de óxido nítrico para retrasar la etapa de senescencia en frutas	27
5.3. Avances tecnológicos y nuevas herramientas para el control de la maduración y senescencia de frutas	28
6. Conclusiones	30
Conclusions	
7. Valoración personal	33
8. Bibliografía	33

1. Resumen

Según su patrón de maduración, las frutas se diferencian en dos categorías principales: climatéricas y no climatéricas. Las primeras continúan madurando incluso después de la cosecha, aumentando su tasa de respiración y produciendo etileno. Las segundas no experimentan cambios significativos en su respiración (pico climatérico) ni en la síntesis de etileno.

A menudo, el sector productor retrasa la recolección de las frutas, con el fin de mejorar su color y su tamaño. El control de la vida útil poscosecha mediante métodos que permiten modificar, hasta cierto punto, la velocidad de maduración, puede conseguir una ampliación de la ventana de cosecha.

Con ese objetivo se han desarrollado tecnologías específicas, como la aplicación exógena de etileno para acelerar la velocidad de maduración, la aplicación de óxido nítrico para alargar la vida útil y la de ethephon para controlar la velocidad de maduración y el color. Técnicas más novedosas, como el análisis por imagen o la resonancia magnética, permiten estudiar en profundidad los cambios que se dan en las frutas durante la maduración y de este modo, recolectarlas en el momento más adecuado. En el presente trabajo fin de grado se realiza una revisión bibliográfica centrada en métodos convencionales para la maduración controlada de frutas y los principales avances tecnológicos para el control de la maduración senescencia de frutas. Para ello, se han empleado buscadores de bases de datos científicas como *Scopus*, o *Science direct*, y el propio de la universidad: Alcorce. Toda la búsqueda se realizó en lengua inglesa debido a la posibilidad de obtener un mayor número de documentos. En la revisión se han incluido únicamente artículos de los diez últimos años.

Las conclusiones más relevantes de la presente revisión sugieren que los métodos convencionales basados en la maduración artificial son apropiados y actualmente frecuentemente utilizados en frutas tropicales y subtropicales. Las nuevas tecnologías para el control de la maduración se basan en la aplicación de técnicas de visión artificial, técnicas hiperespectrales, o incluso IA. .

Abstract

According to their ripening pattern, fruits are categorized into two main types: climacteric and non-climacteric. The former continue to ripen even after harvest, increasing their respiration rate and producing ethylene. The latter do not experience significant changes in their respiration (climacteric peak) or ethylene synthesis.

Often, producers delay fruit harvesting to improve their color and size. Controlling post-harvest shelf life through methods that can modify the ripening speed to some extent can extend the harvest window. To this end, specific technologies have been developed, such as the exogenous application of ethylene to accelerate ripening, the application of nitric oxide to extend shelf life, and the use of ethephon to control ripening speed and color. More innovative techniques, such as image analysis or magnetic resonance imaging, allow for an in-depth study of the changes that occur in fruits during ripening, thus enabling their harvest at the most optimal time.

This final degree project provides a literature review focusing on conventional methods for controlled fruit ripening and the main technological advances for controlling fruit ripening and senescence. Scientific database search engines like Scopus, ScienceDirect, and the university's own Alcorce were used for this purpose. All searches were conducted in English to obtain a greater number of documents. Only articles from the last ten years were included in the review. The most relevant conclusions of this review suggest that conventional methods based on artificial ripening are appropriate and are currently frequently used for tropical and subtropical fruits. The new technologies for ripening control are based on the application of machine vision techniques, hyperspectral techniques, and even AI.

2. Introducción

La maduración y senescencia de los frutos comprende procesos moleculares y bioquímicos complejos y altamente coordinados en los que intervienen genes asociados a la maduración, factores de transcripción, enzimas, represores, moléculas de señalización y vías metabólicas, tanto en frutos climatéricos como no climatéricos. Afectan tanto a la calidad comercial de la fruta como a las pérdidas poscosecha (Figueroa et al., 2021).

La etapa de maduración se puede dividir en tres fases:

- Crecimiento: en este momento comienza el desarrollo del fruto tras la polinización y se produce un crecimiento continuo con el agrandamiento de las vacuolas y la modificación de paredes celulares.
- Desarrollo: en esta etapa el fruto crece de manera exponencial, desarrollándose el cuerpo hasta su tamaño cercano al final.
- Maduración y senescencia. Esta última etapa se puede dividir a su vez en dos: la madurez fisiológica es el momento en el que el fruto alcanza su mayor tamaño y comienza a desarrollar olores, aromas y colores propios del mismo; y la madurez organoléptica, que es el momento en el que el fruto ha terminado de crecer y

adquiere las características que lo hacen comestible y atractivo al ser humano (González et al., 2017). La fase de senescencia se refiere a la muerte y envejecimiento celular, asociada al final de la vida útil del producto.

En esta etapa se producen cambios como el del color, consecuencia de la aparición de pigmentos por degradación de la clorofila y acumulación de antocianinas y carotenoides; el gusto y el aroma se modifican por la producción de componentes volátiles y la degradación de compuestos amargos; el dulzor aumenta por la gluconeogénesis, la hidrólisis de polisacáridos y el acúmulo de azúcares y ácidos orgánicos; el cambio de textura está mediado por enzimas que alteran la estructura y composición de las paredes celulares, degradándolas y haciéndolas menos resistentes (Islam et al., 2016).

2.1 Frutas climatéricas y no climatéricas

La maduración de la fruta desempeña un papel importante en la senescencia de la planta. Se puedan diferenciar dos tipos de frutos según los cambios que se producen en ellos en esta fase: climatéricos y no climatéricos.

Es importante diferenciar entre los conceptos de climatérico y no climatérico para poder clasificar las frutas. En los frutos climatéricos se produce un pico en la respiración durante la maduración, acompañado de un aumento autocatalítico de la producción de etileno. Los frutos no climatéricos no tienen este pico de respiración ni ese aumento de etileno.

Los frutos climatéricos tienen la capacidad de seguir madurando una vez han sido separados de la planta, y la aplicación de etileno exógeno ha demostrado inducir la maduración de dichas frutas. Todas las frutas de tipo climatérico responden a la aplicación exógena de etileno acelerando las reacciones bioquímicas implicadas en la maduración (Fan et al., 2022).

En cambio, las frutas no climatéricas experimentan un proceso de maduración gradual y continua únicamente cuando están unidas a la planta. Separados de ella, su maduración es prácticamente inexistente, y tampoco reaccionan ante el etileno exógeno (Paul et al., 2011). Una vez recolectadas, no maduran por sí solas, por lo que es importante cosecharlas en el momento adecuado (Yongfeng Guo, 2018).

Además, las frutas no climatéricas se pueden ver afectadas por muchos más factores a la hora de madurar que las frutas climatéricas, ya que no dependen únicamente del etileno (Fan et al., 2022).

2.2 Compuestos implicados en las reacciones bioquímicas de maduración y senescencia de frutas

2.2.1 El etileno: la hormona de la maduración

La maduración ha recibido una atención considerable debido a los cambios drásticos en una amplia gama de procesos metabólicos que ocurren antes y después de este acontecimiento, y porque tiene relevancia para la investigación tanto básica como aplicada.

El descubrimiento de los mecanismos de control de la maduración ha revelado los principales agentes de la misma, incluidos factores de transcripción, como los codificados por RIN (inhibidor de la maduración), un gen MADS-box, y CNR (no maduración incolora), un gen SPB-box (inhibidor de la maduración), que son necesarios para el progreso de prácticamente todos los procesos de maduración, así como los componentes de transducción de señales que influyen en las hormonas de la maduración (Gamrasni et al., 2020).

El etileno es un compuesto orgánico gaseoso constituido por dos átomos de carbono y cuatro de hidrógeno y es el primer término de la serie de los alquenos (Cocetta and Natalini, 2022). Puede promover la maduración de la fruta, así como acelerar la senescencia de la misma (Wang et al., 2023).

La biosíntesis del etileno se cataliza a través de las actividades de la aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) sintetasa y la ACC oxidasa, con la metionina como principal sustrato para la síntesis del etileno (Seymour et al., 2013). El primer paso es la transformación de la metionina en S-adenosil-L-metionina (SAM) por la adición de adenina y el uso de ATP, a través de la enzima SAM sintetasa, que también participa en la producción de ACC, generando como residuo la 5-metiltioadenosina, que se recicla a metionina a través del ciclo de Yang, permitiendo la producción de etileno con muy poca cantidad de metionina.

Se pueden diferenciar dos sistemas de biosíntesis de etileno:

- Sistema 1: corresponde a una baja producción de etileno en el periodo pre-climatérico de los frutos climatéricos y está presente a lo largo del desarrollo de frutos no climatéricos. Está autoinhibido por el propio etileno (Cocetta and Natalini, 2022).
- Sistema 2: producción de etileno autorregulatoria llamada síntesis autocatalítica, específica para frutos climatéricos, donde entran en juego enzimas mencionadas anteriormente, como las ACC sintetasa y oxidasa, generando una mayor cantidad de etileno. No cuenta con autoinhibición (Seymour et al., 2013).

El etileno tiene un papel significativo en la poscosecha de frutas, hortalizas y cultivos ornamentales. Se ha investigado extensamente y se han descubierto nuevas funciones específicas para diferentes tipos de productos aplicados en poscosecha. Además de su papel en la maduración de frutos climatéricos, el etileno afecta la calidad comercial de frutos inmaduros y no climatéricos, y también actúa como un buen indicador en el desarrollo de algunos problemas fisiológicos poscosecha, como los daños por frío. La distinción entre frutos climatéricos y no climatéricos basada en el etileno no siempre es clara, lo que sugiere un posible papel generalizado de esta fitohormona en la maduración de la fruta (Cocetta and Natalini, 2022).

Además, el etileno es capaz de acelerar procesos metabólicos concretos, dependiendo de la fruta y la cantidad que se aplica de este gas, así como de mejorar la capacidad antioxidante de las frutas y retrasar el deterioro de las mismas (Wang et al., 2023).

2.2.2 Óxido nítrico: regulador de importantes procesos fisiológicos asociados a la maduración y senescencia.

El óxido nítrico (NO) es una pequeña molécula que actúa como un importante señalizador en términos de funciones fisiológicas en los sistemas vegetales (Zhang et al., 2019). Interviene en la regulación de muchos procesos fisiológicos fundamentales de las plantas.

El NO puede absorberse de la atmósfera o del suelo y fijarse mediante la nitrificación, pero también se sintetiza fácilmente a través de varias vías endógenas, mediante procesos de oxidación y reducción. En ambos casos puede darse la vía enzimática y la no enzimática (Liu et al., 2023).

La reacción enzimática implicada en la vía de reducción es principalmente la formación de NO a partir de nitrito bajo la acción de la nitrato reductasa (NR) (W. Zhang, et al 2020). Por otro lado, en la síntesis por reducción hay cadenas de transporte de electrones mitocondriales en condiciones de bajo oxígeno y hemoproteínas desoxigenadas en condiciones ácidas que también podrían producirlo (Pols et al., 2022).

La principal manera en que se produce NO por oxidación en las células vegetales es a través de la transformación de L-arginina por la enzima NO sintasa. Sin embargo, por el momento sólo se ha identificado un único gen responsable de la producción de NO en células vegetales, que se ha encontrado en las algas verdes. Hay otras formas de generar NO en células vegetales, como la oxidación del S-nitrosoglutatión y el metabolismo de las poliaminas, que aún no están completamente comprendidas (Liu et al., 2023).

El NO participa en funciones como el control del metabolismo o la protección contra las heridas por frío (Zhu et al., 2021). También reduce la síntesis de etileno durante el proceso de maduración y senescencia de la fruta. Es probable que esta interacción ocurra a nivel de los receptores hormonales. Además, el NO incrementa la actividad de las enzimas antioxidantes. De hecho, el NO se ha utilizado para extender la vida útil de las frutas después de ser cosechadas (Gergoff Grozeff et al., 2017). Un ejemplo de su elevada efectividad es su uso combinado con 1-metilciclopropeno (1-MCP) para aumentar la vida útil poscosecha de los arándanos, reduciendo la pérdida de peso y disminuyendo su metabolismo respiratorio a los 14 días de frigoconservación. Además, preserva la firmeza de la fruta y aumenta la concentración de aminoácidos manteniendo el estado redox reducido durante el almacenamiento (Gergoff Grozeff et al., 2017).

2.3 Tecnologías poscosecha convencionales asociadas al control de la maduración y senescencia de frutas

2.3.1. Aplicación exógena de etileno

La calidad objetiva de la fruta después de la cosecha está claramente influenciada por el grado de madurez del producto en el momento de la recolección. El control de la maduración tiene efectos en muchos campos: logra una mayor vida útil poscosecha al reducir las pérdidas durante el transporte y la comercialización, disminuye la susceptibilidad a los daños mecánicos, alteraciones fisiológicas o desarrollo de podredumbres, y esto permite afianzar los mercados existentes y abrir nuevas oportunidades mediante la oferta de frutas de excelente calidad (Figueroa et al., 2021; Payasi and Sanwal, 2010).

Desde hace mucho tiempo se emplean métodos para regular la maduración de manera artificial, obteniendo frutas con el color, tamaño y firmeza ideales sin riesgo de sobremaduración (Maduwanthi & Marapana, 2019). Ampliar así la ventana de venta puede lograrse mediante métodos que permiten controlar hasta cierto punto la velocidad de esta etapa: la mayoría de las tecnologías utilizadas hasta el momento se han basado en la aplicación de etileno de forma exógena o de otras hormonas del crecimiento

El papel de esta hormona se empieza a observar de manera más activa cuando se produce un aumento de su producción de manera autocatalítica; este aumento va variando según el tipo de fruta, no en todas se produce al mismo tiempo ni en la misma concentración.

Tabla 1. Ejemplos de tratamientos con etileno exógeno utilizados para la maduración artificial de frutas y sus efectos más característicos.

Fruta	Tratamiento	Efectos en la calidad del fruto	Fuente
Melocotón	800 mg/L etileno a 25 °C, 5 minutos	Acelera el ablandamiento y aumenta la producción de carotenoides	Xiao et al., 2022
Uvas	1000 ppm de, 36 horas	Aumenta la producción de antocianinas, presentes posteriormente en el vino, acelera su maduración	Becatti et al., 2014
Banana	50 µL/L de etileno, durante 16 horas	Acelera la maduración, generación de compuestos volátiles y aumento del color	Zhu et al., 2015
Caqui	50 µL/L de etileno, durante 18 horas	Aumenta la producción de volátiles, sólidos totales, y ablandamiento de la fruta	Kou et al., 2020
Pera	5 µL/L de etileno, durante 8 horas	Aumenta la actividad enzimática, acelera la maduración, retrasa el pardeamiento	Ma et al., 2017

2.3.2. Tratamientos con ethephon

El ethephon es un fitorregulador con propiedades sistémicas que actúa sobre el crecimiento vegetal, acelerando la maduración y la coloración de los frutos, disminuyendo las pérdidas postcosecha y mejorando la aptitud para la conservación. En un estudio llevado a cabo por (Moniruzzaman et al., 2015), se trataron tomates verdes con diferentes concentraciones de ethephon para comprobar su efecto sobre la pérdida de peso, el desarrollo de podredumbres y su maduración. Los resultados muestran que el uso de concentraciones de 750 a 1000 ppm de ethephon puede acelerar la maduración hasta cuatro días, aumentando la vida útil poscosecha y mostrando un efecto significativo en la reducción de la pérdida de peso.

En otro estudio llevado a cabo por Zhang y Zhou, (2019), se aplicó un tratamiento poscosecha de ethephon (1000 ppm/20°C/9 días) sobre limones. Se demuestra que el ethephon puede mejorar el color de la fruta tratada sin afectar al sabor y sin efectos nocivos manteniendo o aumentando el valor de la misma, al ser el color uno de los principales componentes para atraer a los consumidores.

También se ha evaluado su efecto sobre diferentes tipos de plantas ornamentales. Un ejemplo es el estudio llevado a cabo por Jiang et al., (2015), realizado con *Gynura bicolor*, que al ser tratada con ethephon 200 µL/L y almacenada a temperatura ambiente durante una semana, retrasa la senescencia y reduce los procesos metabólicos, alargando su vida útil tras la cosecha.

2.3.3 Aplicación de óxido nítrico para prolongar la vida útil poscosecha

Desde la década de 1990, el NO ha sido objeto de varios estudios en horticultura y su formación endógena se ha relacionado con varios fenómenos fisiológicos, como la modulación del estrés hídrico y la germinación, entre otros. No es hasta años después que se empieza a estudiar el efecto que tiene el NO en la postcosecha y vida útil de las plantas.

El óxido nítrico actúa como una molécula de señalización gaseosa y se considera un regulador clave en el almacenamiento y retraso de la senescencia poscosecha de frutas. Los estudios más recientes han descubierto que la aplicación exógena puede mejorar eficazmente la calidad y prolongar la vida útil de la fruta poscosecha, inhibiendo además las enfermedades y fisiopatías asociadas a la etapa de senescencia y aliviando los daños por frío (Li et al., 2022).

Se emplea en una gran variedad de frutas, aunque la mayoría de ellas son climatéricas y suelen ser tropicales: uvas, kiwi, ciruelas japonesas, mangos, etc. (Li et al., 2022; Liu et al., 2023;).

Es capaz de aumentar la vida útil y retrasar la maduración y la senescencia al inhibir la ACC sintasa y oxigenasa, que son las enzimas encargadas de sintetizar la S-adenosilmetionina, el precursor de etileno. El NO las inhibe, reduciendo la producción de etileno; además inhibe genes relacionados con la percepción y señalización de este compuesto (Liu et al., 2023).

El NO también controla las enfermedades poscosecha e inhibe el oscurecimiento de los frutos. Estos efectos están relacionados con la capacidad del NO para inhibir la síntesis de etileno, aumentar la actividad de las enzimas antioxidantes, activar las enzimas con efecto antimicrobiano, aumentar la acumulación de sustancias antimicrobianas y mantener la integridad de la membrana (Zhang et al., 2020; Li et al., 2022; Liu et al., 2023).

En la tabla 2 se muestran ejemplos de cómo el uso de NO, ya sea por aplicación gaseosa o mediante inmersión, ayuda a retrasar la senescencia de las frutas prolongando su vida útil. Es necesario tener en cuenta otras condiciones, como la temperatura de almacenamiento y la duración del tratamiento.

Tabla 2. . Ejemplos de tratamientos con óxido nítrico utilizados para el retraso de la senescencia de frutas y sus efectos más característicos.

Fruta/hortaliza	Tratamiento	Efectos en la calidad del fruto	Fuente
Tomate	0.02 mM nitroprusiato de sodio (SNP), almacenado 2 °C	Reduce las heridas por frío	Zhang et al., 2020
Guava	1 mM SNP, durante 5 minutos	Aumento de vida útil, retraso de la senescencia	Sahu et al., 2020
Uvas	300 µL/L NO, durante 2 horas a 0 °C	Mitiga el daño oxidativo	Zhang et al., 2019

2.4 Avances tecnológicos y nuevos retos en el estudio de los parámetros implicados en la maduración de frutas

La maduración de la fruta es un proceso complejo en el que intervienen genes, hormonas y factores ambientales. Comprender su mecanismo es importante para prolongar la vida útil de las frutas duración su almacenamiento (Ko et al., 2020). El conocimiento actual sobre los mecanismos de maduración de las frutas está muy limitado a frutas comunes, como el tomate y la manzana. Recientemente se ha comenzado a aplicar tecnologías más modernas, como la resonancia magnética, el análisis de imagen con teléfonos inteligentes, e incluso inteligencia artificial, para obtener una comprensión más completa de la función, la regulación y reacciones bioquímicas implicadas en el proceso de maduración (Wee et al., 2023).

Un ejemplo es el uso de la resonancia magnética en la ciruela verde (*Buchanania obovata*) australiana, que es una fruta poco conocida, consumida principalmente por los aborígenes (Fyfe et al., 2023). El uso de la resonancia permite ver de manera completa la estructura de la fruta sin necesidad de destruirla para analizar el estado de maduración en el que se encuentra, permitiendo estudiar su desarrollo y establecer los diferentes grados de madurez.

Otra tecnología en desarrollo es el empleo de inteligencia artificial para diferenciar frutas climatéricas que hayan madurado de forma natural o artificial. En el estudio desarrollado por Sreeraj et al., (2020) se utilizaron diferentes funciones de un teléfono inteligente para aplicar un histograma desarrollado que permite estimar el grado de madurez en función de diferentes tipos de parámetros.

3. Justificación y objetivos

La calidad organoléptica de las frutas, es crucial para la aceptación por parte de los consumidores. Está influenciada por los siguientes atributos: color, firmeza, acidez y dulzor (°Brix). El color uniforme indica frescura y madurez, aunque las preferencias varían culturalmente y según cada persona. La firmeza es esencial para la comercialización y vida útil, se ve afectada por la recolección y temperatura de almacenamiento, y es evaluada mediante técnicas específicas. El contenido en °Brix está relacionado con el contenido de azúcar, determinando la dulzura y jugosidad de la fruta. La combinación de un color atractivo, firmeza adecuada y dulzura óptima es fundamental para satisfacer las preferencias del mercado.

Controlar el momento exacto de la maduración para obtener frutas con el color, tamaño y firmeza ideales sin riesgo de sobremaduración y ampliar así la ventana de venta puede

lograrse mediante métodos que permiten controlar hasta cierto punto la velocidad de maduración.

Desde hace años se vienen aplicando diferentes tipos de tecnologías poscosecha que controlan y modulan los procesos implicados en las etapas de maduración y senescencia de las frutas. La más ampliamente utilizada es la aplicación de etileno exógeno de forma controlada. En los últimos años también se vienen aplicando tratamientos con ethephon en diferentes concentraciones. Además, se ha comprobado que determinados compuestos como el óxido nítrico, capaces de inhibir las reacciones bioquímicas implicadas en la senescencia de las frutas, permiten prolongar con éxito la vida útil de determinados productos. En los últimos años se están desarrollando nuevos avances relacionados con la aplicación de tecnologías no destructivas, como el análisis de imagen, que deben de ser estudiados en mayor profundidad y con más aplicaciones. Estos avances tecnológicos representan nuevos retos en el estudio de los parámetros implicados en la maduración de frutas.

El objetivo principal del presente trabajo fue revisar los principales métodos de maduración controlada de determinados tipos de fruta, que se vienen utilizando de forma rutinaria en la actualidad. Un objetivo secundario fue realizar una valoración de los diferentes avances e innovaciones tecnológicas que vienen aplicándose en los últimos años con este mismo fin o con el objetivo de monitorizar y comprender las reacciones implicadas en las etapas de maduración y senescencia de la fruta.

4. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se ha realizado una revisión bibliográfica de artículos científicos, guías y artículos de internet publicados en los 10 últimos años sobre la maduración artificial y el estudio de las reacciones implicadas en esa etapa en determinados tipos de fruta.

En la primera fase se han establecido como criterios de búsqueda palabras o términos directamente relacionados con el tema en Google Académico, haciendo uso de la búsqueda manual. Las primeras palabras clave empleadas han sido: “poscosecha”, “maduración artificial” y “tratamientos poscosecha”.

A continuación se exponen los resultados de esta búsqueda tanto en inglés como en español:

- Búsqueda en español:
 - o Poscosecha/post-cosecha: 23700 resultados
 - o Maduración artificial: 18000 resultados
 - o Tratamiento poscosecha/post-cosecha: 59000 resultados

- Búsqueda en inglés:
 - o Post-harvest: 851000 resultados
 - o Artificial ripening: 215000 resultados
 - o Post-harvest treatments: 315000 resultados

Aunque hay gran cantidad de resultados en los dos idiomas, en inglés aparece una cantidad muy superior de artículos. Destacar que estas primeras palabras de búsqueda resultaron muy generales, por lo que los resultados fueron dispersos y no muy específicos. Por este motivo se llevó a cabo una segunda indagación en otros buscadores bibliográficos. Se utilizó la herramienta de búsqueda avanzada, que permite afinar los resultados dentro de parámetros específicos. Se emplearon distintas combinaciones de términos y operadores (AND para que todas las palabras estén presentes, OR para que al menos una lo esté). Se restringió la búsqueda a publicaciones de los últimos 10 años (2013-2024) y al idioma inglés. Después de aplicar estos criterios, se evaluaron los resultados para determinar si el uso de operadores y términos específicos lograba reducir el número de resultados obtenidos. De esta manera, se descartaron aquellos que no eran relevantes para el estudio, manteniendo los que sí lo eran.

Las fuentes empleadas fueron:

- Science Direct: es una de las mayores fuentes de información para la investigación científica, técnica y médica. Permite que los usuarios se mantengan informados en sus campos y puedan trabajar de manera más eficiente. Ofrece el texto completo de las revistas científicas que publica Elsevier y capítulos de libros, procedentes de más de 32.500 revistas con revisión por pares y de más de 30.000 libros. En total, supera los 11 millones y medio de artículos y capítulos.
- Alcorze: es un motor de búsqueda que remite a los recursos de información de la Biblioteca de la Universidad de Zaragoza (BUZ), tanto de fuentes internas (catálogo de la biblioteca, repositorio institucional Zaguán, Lista AtoZ...) como externas (bases de datos), en formato impreso o electrónico. También permite localizar publicaciones en acceso abierto. Se encuentra en funcionamiento desde el año 2013.
- Web of Science: es una base de datos bibliográfica que contiene información sobre investigación multidisciplinaria de alta calidad publicada en revistas líderes mundiales en ciencias, arte y humanidades. Se identifican todos los documentos significativos, de modo que además de artículos pueden buscarse cartas, correcciones, editoriales y revisiones que hayan aparecido en una revista.
- Scopus: es la mayor base de datos de resúmenes y citas de literatura revisada por pares: revistas científicas, libros y actas de congresos. Al ofrecer una descripción general

completa de la producción de investigación mundial en los campos de la ciencia, la tecnología, la medicina, las ciencias sociales, las artes y las humanidades, Scopus presenta herramientas inteligentes para rastrear, analizar y visualizar la investigación.

En la tabla 3 se muestran los resultados de estas combinaciones y la inclusión de conectores.

Tabla 3. Número de artículos obtenidos tras la búsqueda con diferentes combinaciones y operadores

Palabras	Web of Science	Science direct	Alcorze	Scopus
Postharvest and artificial ripening	37	1052	128	13
Postharvest controlled ripening	1024	5887	505	21
Artificial ripening	369	7447	1110	237
Induced ripening	2364	29667	6589	723
Ethephon or Ethylen postharvest	1038	268	3573	5437
Nitric oxide postharvest	484	1293	1489	1637
Intermittent warming postharvest	19	245	57	282
Accelerated ripening	824	15782	960	30
Climacteric fruit, ripening, image processing	11	980	17	13

5. Resultados y discusión

En las tablas 4 y 5 se indican las publicaciones científicas incluidas en la Revisión Bibliográfica así como sus objetivos y principales conclusiones y resultados obtenidos.

Tabla 4. Estudios incluidos en la revisión bibliográfica clasificados en función del tipo de tecnología empleada.

Métodos convencionales para la maduración artificial de fruta	Aplicación de óxido nítrico para para retrasar la etapa de senescencia	Avances tecnológicos y nuevos retos en el estudio de los parámetros implicados en la maduración de frutas
Zhang y Zhou, 2019	Zhu et al., 2021	Baek et al., 2020
Xiao et al.,2022	Kang et al., 2016	Chai et al., 2022
Becatti et al.,2014	Pols et al., 2022	Cho & Koseki, 2021
Lafuente, Alférez y Romero 2014	Sahu, Barman y Singh, 2020	Fyfe et al., 2023
Ma et al.,2017	Zhang et al., 2019	Ghatak et al., 2021
Li et al.,2019	Li, Yu y Liao, 2022	Sreeraj et al., 2020
Cui et al.,2020	Buet et al., 2021	Shuprajhaa et al., 2023
Moniruzzaman et al.,2016		Vélez-Rivera et al., 2013
Pongprasert, Srilaong y Sugaya, 2020		Wakchaure et al., 2023
		Wee et al., 2023
		Shelke et al.,2023

Tabla 5. Tabla resumen de los estudios consultados atendiendo al tipo de estudio, objetivos del mismo y resultados.

AUTOR	TIPO DE ESTUDIO	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	RESULTADOS OBTENIDOS
Zhang y Zhou 2019	Primario	Investigar los efectos del tratamiento con ethephon en el cambio de color de los limones 'Eureka'.	<p>El tratamiento de frutos madurados con una concentración de ethephon de 1000 mg/L, y un almacenamiento a 20 °C durante 9 días, permitió obtener el color deseado de los limones. Los frutos madurados artificialmente mostraron un valor de C* superior al de los frutos control (sin tratamiento de maduración), después de 6 días a temperatura ambiente y sin ningún compuesto</p> <p>Los frutos tratados con ethephon presentaron un mayor índice de madurez, con un valor más alto de la relación °Brix/acidez. El ácido ascórbico mostró una disminución del 10,09% en las frutas tratadas y de un 20,78% en las control, en cambio el ácido cítrico tuvo una disminución mayor en las tratadas, de 1,969 mg/g a 0,678 mg/g, mientras que en los control solo disminuyó 0,295 mg/g.</p>
Xiao et al., 2022	Primario	Evaluar los efectos del etileno exógeno y de un antagonista del etileno (1-metilciclopropeno, 1-MCP) en el metabolismo de los carotenoides en la pulpa de melocotón después de la cosecha.	<p>Las frutas se trataron con una concentración de 800 mg/L en solución a 25 °C, donde se sumergieron durante 5 minutos, tras esto se almacenaron durante 16 días a 25 °C con una humedad relativa del 85-90 %.</p> <p>Se observó un aumento en el contenido total de carotenoides, así como en la composición de carotenoides individuales, como la luteína, el β-caroteno, la β-cryptoxantina y la zeaxantina. Además, el tratamiento con etileno también aceleró la producción endógena de etileno y el ablandamiento de la fruta durante el almacenamiento. El análisis de la expresión génica mostró que el tratamiento aumentó los niveles de transcripción de genes sintéticos de carotenoides y factores de transcripción en la pulpa.</p>
Becatti et al., 2014	Primario	Analizar si un tratamiento poscosecha de 36 horas con una concentración de etileno de 1000 ppm y una temperatura de aplicación de 15 a 20 °C puede inducir cambios en los	<p>El tratamiento con etileno provocó un aumento significativo en varios tipos de compuestos como flavonoles, antocianinas y estilbenos. Se comprobó además que la aplicación del tratamiento tuvo una influencia significativa</p>

		compuestos fenólicos y aromáticos en las uvas variedad Sangiovese	sobre la vinificación, observando un cambio en su perfil aromático. Estos resultados sugieren que el tratamiento poscosecha con etileno puede afectar tanto el metabolismo poscosecha de las bayas como la calidad del vino obtenido.
Lafuente, Alférez y Romero 2014	Primario	Determinar el efecto del tratamiento con etileno durante 4 días, a una temperatura de entre 2 y 12 °C y una concentración de 2 µL/L, en la calidad de las naranjas dulces Navelate y Lane Late maduras almacenadas en condiciones comerciales. El estudio se enfoca en reducir la pérdida de calidad de las naranjas almacenadas, especialmente en relación la susceptibilidad al desarrollo de daños por frío.	Se analizaron dos grupos de naranjas tratados con etileno y conservados a 2 y 12 °C respectivamente. No aumentó el color de las frutas, pero redujo la abscisión del cáliz y la aparición de pitting en la piel (síntoma asociado al daño por frío) en ambos cultivares almacenados a 12°C. Además, se observó un aumento en la tolerancia a esta fisiopatía. Esta mayor tolerancia solamente se observó en la variedad Navelate. La variedad Lane Late presentó una elevada incidencia y severidad del daño. El tratamiento aumentó ligeramente el contenido de flavonoides en la pulpa de las naranjas Navelate, pero las diferencias significativas entre las frutas tratadas y las no tratadas solo se encontraron después de un almacenamiento prolongado a 2°C.
Ma et al., 2017	Primario	Investigar el efecto de la aplicación de etileno exógeno en la inhibición del oscurecimiento de la piel después de la cosecha de peras 'Huangguan'. Se aplicaron tres concentraciones de etileno diferentes: 0,70, 1,28 y 5 uL/L. En todas, la temperatura de almacenamiento es de 0 °C durante 20 días.	Los resultados mostraron que los tratamientos con etileno a 0,70 y 1,28 uL/L disminuyeron la tasa de oscurecimiento de 73,80% a 6,80% tras 20 días de almacenamiento a 0 °C. Los tratamientos con etileno a 5 uL/L inhibieron por completo la aparición de oscurecimiento del pardeamiento. Además, los tratamientos con etileno a 5 uL/L disminuyeron la pérdida de electrolitos y la tasa de respiración, retrasando a su vez la pérdida de compuestos fenólicos totales. Este último tratamiento también aumentó la actividad de algunas enzimas, como la catalasa y la ascorbato peroxidasa, e inhibió la actividad de la polifenoloxidasa y la peroxidasa.
Li et al., 2019	Primario	Estudiar y analizar efectos en la regulación del etileno empleando 1-MCP en la maduración y senescencia de las setas de botón	El tratamiento con etileno aceleró la maduración y senescencia, provocando un cambio en el color, el aroma y la apariencia de las setas, y aumentó la expresión de genes como el gen ACO (oxidasa de ACC) y el gen PPO4 (polifenol oxidasa), relacionados directamente con la maduración y senescencia. Por otro lado, el tratamiento con 1-MCP, retrasó tanto la

			maduración como la senescencia y provocó una menor pérdida de la aceptabilidad sensorial y de apariencia en las setas, además de reducir la expresión de los genes ACO y PPO4.
Cui et al., 2020	Primario	Investigar el mecanismo molecular subyacente en la aceleración de la maduración y la coloración divergente de las flores y receptáculos de higos (<i>Ficus carica L.</i>) tratados con 1 ml de ethephon con concentración de 250 mg/L. Se hicieron medidas a los 2, 4 y 6 días de tratamiento.	Se analizó el transcriptoma de las flores y receptáculos de higos tratados con ethephon en comparación con los controles no tratados. Se identificaron genes diferencialmente expresados y se realizaron análisis de enriquecimiento de genes y vías metabólicas para comprender los cambios biológicos inducidos por el ethephon. Se observó un aumento considerable en la liberación de etileno en los tratados con ethephon en comparación a los no tratados. Hubo un aumento en el crecimiento de los frutos tratados, que acabaron con un diámetro de 50,23mm en comparación con los 41,33 del control. De la misma manera ocurrió con el peso, llegando hasta un 140% más tras 6 días de tratamiento. Lo contrario ocurrió con la firmeza, sufriendo una pérdida de casi el doble los tratados a los seis días.
Moniruzzaman et al., 2016	Primario	Evaluar la influencia del ethephon en la maduración y la calidad de los frutos de tomate de invierno recolectados en diferentes estados de madurez. Determinar el estado de madurez del fruto más adecuado para la aplicación poscosecha de ethephon.	El grado de madurez más adecuado para la aplicación de ethephon tras la cosecha fue la fase verde madura. La aplicación en esta fase puede acelerar la maduración del tomate varios días, siendo el tratamiento más eficaz el de 500-1000 ppm. Los mejores resultados se obtuvieron al aplicar concentraciones de ethephon de 500-750 ppm, llegando a acelerar la maduración hasta 4 días, reduciendo la pérdida de peso que sufren poscosecha y aumentando su vida útil con el tratamiento, en comparación con la muestra control.
Pongprasert, Srilaong y Sugaya 2020	Primario	Investigar la eficacia de la técnica de microburbujas de etileno (C2H4-MBs) como alternativa para acelerar la maduración poscosecha del plátano (<i>Musa spp.</i>). El tratamiento va desde la inmersión en C2H4-MBs durante 10 ó 20 minutos, a la fumigación con una concentración de 1000 mg/L. Todos ellos después almacenados a 25 °C durante 10 días.	La aplicación de microburbujas de etileno (C2H4-MBs) durante sólo 10 minutos fue capaz de madurar los plátanos de forma similar a la técnica convencional (tratamiento gaseoso). Esta nueva forma de aplicación permitió reducir el tiempo de aplicación. La eficacia del tratamiento con C2H4-MBs durante 10 ó 20 minutos para acelerar la maduración del plátano fue comparable a la técnica convencional. Además, la nueva técnica permitió una maduración más

			homogénea de los racimos de plátano.
Kou et al., 2020	Primario	Investigar los cambios fisiológicos y la expresión génica relacionada con la maduración de la fruta del caqui, lo que puede ayudar a mejorar el almacenamiento y la comercialización de la fruta. Emplearon etileno a 50 µL/L durante 18 horas, y un almacenamiento durante 30 días a 20 °C.	El tratamiento con etileno fue de 50 µL/L durante 18 horas, tras lo cual los caquis fueron almacenados a 20 °C durante 30 días, con una humedad relativa del 65%. El tratamiento con etileno aceleró la maduración de los frutos y provocó una rápida disminución de su firmeza. En concreto, la fruta tratada con etileno exógeno empezó a ablandarse rápidamente a los dos días de almacenamiento, y mostró picos de producción de etileno a los 2, 8 y 12 días, acelerando la respiración y su maduración.
Zhu et al., 2021	Primario	Evaluar los efectos del tratamiento con óxido nítrico (NO) en la calidad poscosecha de las naranjas Navel durante el almacenamiento en frío. Fueron tratadas con una concentración de 15 µL/L y almacenadas a 5 °C.	El tratamiento con NO a una concentración de 15 µL mejoró la calidad de almacenamiento poscosecha y redujo la tasa de descomposición de la naranja Navel 'Newhall'. El tratamiento inhibió significativamente la pérdida de peso y mantuvo los parámetros de calidad [de sólidos solubles (SSC), acidez titulable (TA) y vitamina C (VC)] dentro de los rangos exigidos a nivel de estándares de calidad. Además disminuyó la tasa de respiración y suprimió la generación de anión superóxido (O ₂ ⁻) y peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂). Se observó un aumento significativo en la capacidad antioxidante, así como en las actividades de enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y la peroxidasa (POD). Por último, mejoró significativamente las actividades de enzimas relacionadas con la resistencia a enfermedades en las naranjas, como la fenilalanina amonio-liasa (PAL), la polifenoloxidasa (PPO), la β-1,3-glucanasa (GLU) y la quitinasa (CHT).
Kang et al., 2016	Primario	Investigar los cambios en el perfil proteico de los frutos de melocotón durante la maduración después del tratamiento con óxido nítrico poscosecha. El estudio busca comprender los efectos del óxido nítrico en la proteómica de los melocotones y cómo afecta a procesos biológicos como el metabolismo poscosecha, la respuesta al estrés, la estructura celular, la maduración y la senescencia. El tratamiento aplicado fue una sala con NO a 10 µL/L durante	Se observaron cambios en el perfil proteico de los frutos de melocotón tratados durante la maduración. Se identificaron un total de 104 proteínas con cambios significativos en su concentración en respuesta al NO. Estas proteínas se clasificaron en 7 categorías en función del tipo de efecto asociado, que incluyen energía y metabolismo, respuesta al estrés y defensa, estructura celular, destino de las proteínas, transporte y transducción, maduración y senescencia, y otro tipo de funciones. Se comprobó un aumento en la actividad de la superóxido dismutasa (SOD)

		3 horas, tras lo cual se ventiló y se almacenaron a 25 °C durante 5 días.	y las enzimas del ciclo ascorbato-glutatión para promover la producción de la enzima 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), que afecta la producción de etileno. A su vez, inhibe el transporte de electrones y el consumo de oxígeno, mejora el ciclo del ácido tricarboxílico (TCA) y la vía de la glucólisis.
Pols et al., 2022	Revisión	Investigar el papel del óxido nítrico en la biología poscosecha y su aplicación en el almacenamiento y conservación de productos agrícolas. Comprender los mecanismos de síntesis y señalización del NO, así como su interacción con otras hormonas vegetales y su influencia en la calidad y vida útil de los productos después de la cosecha.	Destaca la interacción entre el NO y la hormona vegetal etileno, donde se ha observado un efecto antagonista del NO sobre la producción de etileno. Se ha propuesto que el NO forma un complejo NO-ACC-ACO que limita la biosíntesis de etileno en las frutas, lo que a su vez preserva la firmeza y retrasa el proceso de senescencia, aumentando la vida útil. Ha demostrado que el NO puede regular la respuesta al estrés de las plantas al interactuar con otras hormonas vegetales como el ácido abscísico (ABA), el ácido salicílico (SA) y el ácido jasmónico (JA).
Sahu, Barman y Singh 2020	Primario	Investigar el efecto de la aplicación de óxido nítrico para la retención de la calidad poscosecha de frutas de guayaba. El estudio se centró en analizar la influencia del tratamiento con nitroprusiato de sodio (SNP), un donante de NO, en la senescencia y calidad fisicoquímica de la fruta de guayaba. Se sumergieron las frutas en tres concentraciones diferentes: 0,5, 1 y 1,5 mM durante 5 minutos, y se almacenaron a 20 °C.	A concentraciones 1 mM de SNP, la pérdida de peso fue del 16%, mientras que a 0,5 mM fue del 22%, tras doce días de almacenamiento. De la misma manera, en las frutas control hubo hasta un 36,66% de perdidas por descomposición tras doce días, mientras que en las tratadas con 1mM SNP, se redujo al 15,55%. La disminución de clorofillas era similar tanto en frutas control como tratadas, aunque un poco más acelerada en las control. Menor pérdida de ácido ascórbico, compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante en las frutas tratadas con SNP. El resultado es el aumento de la vida útil hasta 12 días más a temperatura ambiente, así como la disminución de pérdidas poscosecha por pudrimiento de las frutas.
Zhang et al., 2019	Primario	Estudiar el efecto del tratamiento con óxido nítrico en la calidad poscosecha de las uvas de mesa, específicamente en la mitigación del daño oxidativo causado por especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés). Se trataron a 0 °C con una concentración de NO de 300 µL/L.	Entre los parámetros de calidad analizados, tanto la firmeza como el contenido de sólidos solubles totales (TSS) y acidez titulable (TA), presentaron un descenso similar en las uvas tratadas y en las control. La pérdida de peso y el índice de pardoamiento tras 10 días de almacenamiento de las uvas control fueron significativamente más altas que en las tratadas con NO: un 133% y un 34%, respectivamente.

			El tratamiento con óxido nítrico aumentó la actividad de enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), la peroxidasa (POD), la catalasa (CAT) y la glutatión reductasa (GR), de esta manera aumenta la vida útil al mejorar las condiciones y la calidad de la uva.
Li, Yu y Liao 2022	Revisión	Analizar el papel del óxido nítrico en la senescencia poscosecha de las frutas	Se busca comprender cómo el NO puede mejorar la calidad y prolongar la vida útil de las frutas después de la cosecha, mediante la inhibición de enfermedades poscosecha, la mitigación del daño por enfriamiento y la regulación de diversos procesos fisiológicos en las frutas. Se examinan los mecanismos de acción del NO, como la regulación de la biosíntesis de etileno, el sistema antioxidante, el metabolismo de poliaminas y el de la pared celular, entre otros.
Buet et al., 2021	Revisión	Proporcionar una visión general del papel del óxido nítrico como gasotransmisor en la poscosecha de la fruta, incluyendo sus efectos sobre la maduración, las respuestas al estrés y la protección contra las enfermedades poscosecha. El artículo también analiza el uso potencial de donantes de NO como estrategia para mejorar la vida útil y la calidad de la fruta tras la cosecha.	Analiza los mecanismos de acción del NO y sus interacciones con otras fitohormonas, así como el posible uso de donantes de NO y otras estrategias para aumentar sus niveles con un alcance tecnológico. Sugiere que el uso de donantes puede ser una estrategia potencial para aumentar los niveles de NO y mejorar la vida útil y la calidad poscosecha de la fruta. Sin embargo, la viabilidad de este enfoque puede depender de varios factores, incluida la fruta específica y las ventajas y desventajas de las distintas fuentes de NO. También es importante medir los niveles de NO en frutas y verduras para determinar los efectos observados.
Chen et al., 2022	Primario	Determinar los efectos de los tratamientos combinados de ethephon y temperaturas bajas en la calidad poscosecha, perfiles de antocianinas y metabolismo volátil de las naranjas sanguinas.	Para estudiar los efectos de los tratamientos poscosecha con ethephon a una concentración de 2 mg/ml, una temperatura de 8 °C, durante 50 días de almacenamiento, aunque se hicieron pruebas a 25, 8 y 4 °C. El enrojecimiento aumentó gradualmente con el incremento del tiempo de almacenamiento en las tres temperaturas, aunque se hizo más evidente en el almacenamiento a baja temperatura. En particular, el tratamiento combinado aumentó significativamente los niveles de antocianinas individuales, como la cianidina 3-glucósido y la cianidina 3-(6'-malonilglucósido), mostrando ser más efectivo a los 8 °C. Efectos similares

			ocurrieron con el aumento de compuestos volátiles en el grupo a 8 °C tras los cincuenta días, medidos con una GC-enose.
Zhu et al., 2015	Primario	Investigar los efectos del tratamiento combinado de 1-metilciclopropeno (1-MCP) y ethephon en la maduración de frutas de plátano recolectadas. El estudio buscó determinar la concentración y el tiempo de tratamiento óptimo para controlar la maduración y mantener la calidad de las frutas de plátano, así como analizar los cambios fisiológicos y bioquímicos asociados con el tratamiento combinado.	El tratamiento combinado de 1-MCP y etileno tiene un efecto significativo en la maduración de los frutos de plátano cosechados. El estudio encontró que una combinación de 50 mL L-1 de ethephon con 400 nL L-1 de 1-MCP (16 h) era el tratamiento más adecuado. Se llega a esta conclusión ya que una concentración excesiva de estos componentes puede interrumpir el proceso de maduración y desarrollo del plátano, producir un coloramiento desigual sobre la piel, y reducir la vida útil si interrumpe o altera la respiración metabólica. Es importante considerar cuidadosamente las concentraciones, tiempos de tratamiento y métodos de manejo cuando se aplican tratamientos como 1-MCP y etileno a la fruta del banano para asegurar una maduración adecuada, desarrollo del color y mantenimiento de la textura.
Xu et al., 2023	Primario	Investigar el efecto de los tratamientos de etileno y 1-MCP en la calidad de las castañas de agua chinas cortadas frescas, específicamente en la regulación de la calidad de almacenamiento y el pardeamiento enzimático. Se sumergieron en 5 mg/L de 1-MCP durante una hora y en 3,4 g/L de ethephon durante 5 minutos. Tras esto se almacenaron a 5 °C durante 10 días	Se ha demostrado que los tratamientos con ethephon y 1-MCP tienen efectos significativos sobre la calidad de almacenamiento de las castañas de agua chinas recién cortadas. El tratamiento con ethephon inhibió la actividad de la enzima PAL, que está involucrada en la síntesis de compuestos fenólicos. Además, el ethephon también redujo la acumulación de flavonoides, como eriodictiol y naringenina, que son los principales sustratos responsables del pardeamiento enzimático en las castañas de agua chinas.
Baek et al., 2020	Primario	Analizar el efecto de la aplicación de resonancia magnética en tomates cherry para observar cambios de la maduración.	Se examinaron muestras de tomates cherry en seis grados diferentes de madurez, desde verde hasta rojo, empleando un sistema de resonancia magnética. Los cambios en la maduración de los tomates fueron perceptibles tanto cualitativa como cuantitativamente a través del análisis de la señal de las imágenes obtenidas. Se observaron diferencias significativas en la intensidad de la señal según el grado de madurez en

			<p>todos los tipos de tomates.</p> <p>Estos resultados sugieren que la utilización de la resonancia magnética para evaluar la madurez de productos agrícolas de forma no destructiva es viable. Además, dado que la resonancia magnética proporciona una visión detallada de la estructura interna, es posible identificar defectos internos (como magulladuras, huecos o daños por impacto) y otros aspectos relacionados con la calidad.</p>
Chai et al., 2022	Primario	Evaluar el efecto de una atmósfera con una composición del 30 % de oxígeno y 70 % de nitrógeno en kiwis mantenidos durante 7 días a una temperatura de 23 °C, para comprobar el efecto en la velocidad de maduración y en la calidad de la fruta.	<p>Los resultados del estudio muestran que el tratamiento con 30 % O₂ +70 % N₂ durante 7 días a 23 °C aceleró el cambio de color de la pulpa del kiwi 'Hayward color'. Asimismo, la respiración y firmeza de las frutas tratadas aumentaron en comparación con las frutas control en una atmósfera con composición normal.</p> <p>Al sexto día apareció el pico en la producción de etileno, demostrando un efecto sobre la velocidad de maduración y comprobando el potencial de esta nueva técnica para ser aplicada en frutas climatéricas.</p>
Cho & Koseki, 2021	Primario	Estudiar los diferentes cambios en los índices de maduración en banana a cuatro temperaturas diferentes: 20, 25, 27.5 y 30 °C, mediante la utilización de imágenes digitales y redes neuronales artificiales que se basan en el color para clasificar el estado de maduración del plátano en tres niveles, siendo capaz de diferenciar el estado de maduración con una precisión del 95,24%.	<p>Se emplea una red neuronal artificial basada en las características de las escalas de color (L*a*b*, HSV e YUV), para comprobar el cambio de la maduración de los plátanos almacenados a diferentes temperaturas. Se comprueba que tanto la firmeza como el color se ven afectadas por las temperaturas de almacenamiento más altas.</p> <p>Este estudio demostró que la cámara de un teléfono inteligente tiene el potencial de ser utilizada como una herramienta para estimar la calidad de los alimentos para el personal general de la cadena de suministro y los consumidores, y podría ser utilizada como herramienta para seguimiento de la maduración controlada de plátano.</p>
Fyfe et al., 2023	Primario	Identificar y analizar las características de las ciruelas verdes durante su etapa de crecimiento y maduración en varias localizaciones y cosechas. Aplicación de tecnología de resonancia magnética para diferenciar estos cambios.	<p>En el estudio emplearon frutas de 4 localizaciones diferentes, con cinco estados de madurez y en dos campañas diferentes.</p> <p>Las imágenes obtenidas con la resonancia permiten observar la evolución de la maduración de la fruta a través de la diferenciación de sus partes y la</p>

			velocidad de crecimiento; es decir, deja ver por separado la piel, la carne y el hueso, y el desarrollo de cada una. Junto con otros estudios físicos se han podido establecer cinco estados de maduración diferente.
Ghatak et al., 2021	Primario	Estudiar la utilidad de un detector de aroma portátil para diferenciar los grados de madurez de mango.	El estudio emplea un polímero impregnado con 2, 5-Dimethyl-4-hydroxy-3(2 H) furanone, un biomarcador natural procedente del mango maduro, junto con un sensor de cuarzo diseñado para detectar los principales aromas relacionados con su maduración. El sensor tiene una repetitividad del 99,5 % y una reproducibilidad del 98,6 % con respecto al 2, 5-Dimethyl-4-hydroxy-3(2 H) furanone.
Sreeraj et al., 2020	Primario	Utilizar un dispositivo de clasificación rentable calidad-precio que puede identificar con precisión si las frutas climatéricas se han madurado artificialmente o de forma natural. El equipo está compuesto por una raspberryPi, una placa microcontroladora de código abierto y una electro válvula que se encarga de liberar, dosificar y distribuir fluidos.	Los resultados del estudio muestran que el dispositivo alcanza unos índices de precisión y recuperación de 0,93 y 0,92, respectivamente, lo que indica una gran precisión a la hora de distinguir entre frutas maduradas artificial y naturalmente. Puede clasificar varios niveles de frutas maduradas de forma artificial. Muestra su potencial para mejorar la seguridad alimentaria y el control de calidad en la industria alimentaria.
Shuprajhaa et al., 2023	Primario	Desarrollar un sistema de identificación inteligente para clasificar las etapas de maduración del plátano. El sistema combina redes neuronales convolucionales (CNN) con el algoritmo XgBoost para clasificar con precisión los plátanos en cuatro grados de madurez: inmaduro, poco maduro, maduro y demasiado maduro.	El sistema alcanzó una precisión del 91,25% en la clasificación de las etapas de maduración del plátano. La incorporación del análisis discriminante lineal (LDA) permitió una clasificación precisa con un conjunto de datos más pequeño en comparación con los métodos convencionales. Estos resultados demuestran el potencial del sistema para aplicaciones industriales, ofreciendo una solución automatizada y no destructiva para la selección, clasificación e inspección de la calidad de la fruta del plátano con el fin de reducir las pérdidas posteriores a la cosecha y mejorar la eficiencia de la cadena de suministro.
Vélez-Rivera et al., 2013	Primario	Demostrar la eficacia de los sistemas de visión artificial para determinar con precisión la madurez de los mangos, ofreciendo un método no destructivo y eficiente para la	El estudio permite diferenciar de manera no destructiva tres estados de maduración de los mangos: pre-climatérico, de los días 1 al 6 de almacenamiento, climatérico los días 6 a 10, y senescencia, del día 10 al 13.

		evaluación de la calidad.	Los autores concluyen que es posible clasificar las frutas solo empleando los valores obtenidos mediante la aplicación de un sistema de visión artificial para la evaluación del color, sin que sea necesario llevar a cabo análisis destructivos.
Wakchaure et al., 2023	Primario	Evaluar la aptitud de un prototipo para determinar la calidad y la madurez de las manzanas <i>Annona squamosa</i> L, a través del estudio de imágenes obtenidas mediante sistemas de visión artificial.	<p>El dispositivo portátil consta de una placa Raspberry Pi, un módulo de cámara, una pantalla táctil LCD y algoritmos de procesamiento de imágenes para identificar cinco etapas esenciales de madurez: 0, 25, 50, 75 y 100 % de apertura de las areolas.</p> <p>El uso de las imágenes y algoritmos para la maduración ha permitido diferenciar sustancialmente los grados de madurez, obteniendo un 100% de aciertos en la clasificación por este método.</p>
Wee et al., 2023	Revisión	Investigar las aplicaciones del análisis de redes para comprender los procesos moleculares de la maduración de la fruta. Se han utilizado varios tipos de redes biológicas, como las de coexpresión génica, las de regulación génica y las de interacción proteína-proteína.	En esta revisión se incluyen estudios que muestran los diversos enfoques y hallazgos relacionados con los mecanismos de maduración de diferentes tipos de fruta (mangostán, naranja, papaya, etc.), contribuyendo al conocimiento actual de los complejos procesos implicados en la maduración de la fruta y el desarrollo de los parámetros de calidad. Se ha estudiado la modulación específica de la madurez y la fase de maduración del transcriptoma del fruto del tomate, proporcionando información sobre los cambios en la expresión génica asociados a las diferentes fases.
Shelke et al. 2023	Primario	Detectar frutas artificialmente maduradas con una aplicación de Android que utiliza técnicas de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático para la identificación mediante la medición del cambio de color de las frutas al tratarlas con un agente químico que provoca una tonalidad negro-azul en las maduradas de manera artificial.	Presenta un método utilizado para detectar frutas artificialmente maduradas. Incluye el uso de técnicas de procesamiento de imágenes, aprendizaje automático, y dispositivos de detección que emplean inteligencia artificial y conceptos de IoT. Algunos de los métodos específicos incluyen el uso de algoritmos de aprendizaje automático como TensorFlow y CNN, el desarrollo de aplicaciones de Android para el procesamiento visual, el uso de sensores de aroma y textura, y el empleo de dispositivos que combinan cámaras, placas de circuito y algoritmos de clasificación para detectar frutas artificialmente maduradas.

5.1 Métodos convencionales para la maduración controlada de frutas

El ethephon, junto con el etileno, es uno de los componentes mayoritariamente utilizados en la maduración artificial de frutas climáticas. Al ser un agente químico, una de las mayores dudas es su posible efecto adverso en el ser humano. Está registrado en la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU (EPA) desde 1973 como compuesto usado para el control del crecimiento de las plantas, estimular la maduración de los frutos y la floración. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) clasifica el ethephon como perteneciente al grupo D, es decir, no carcinogénico para los humanos (Moniruzzaman et al., 2016).

La cantidad y las condiciones de aplicación de estos compuestos varían según el fruto. Moniruzzaman et al (2016) y Zhang and Zhou (2019) describen su utilización en tomates y limones. En el primer caso se aplicó una dilución acuosa pulverizada a tres concentraciones diferentes, 500, 750 y 1000 ppm, mientras que en los limones el tratamiento fue aplicado mediante inmersión, con una concentración de 1000 mg/L. En el caso del tomate se llevó a cabo un estudio de vida útil de 9 días, realizándose el análisis de diferentes parámetros de calidad a los 3, 6 y 9 días de almacenamiento. Se seleccionó la concentración de ethephon de 500 ppm como la más eficaz (Moniruzzaman et al., 2016). En los limones se comprobó que, tras el tratamiento, la maduración de la piel y de la pulpa fue a dos ritmos diferentes. El estudio se centró en el cambio de coloración de la piel y demostró que el uso del compuesto acelera la degradación de las clorofilas, aportando el color amarillo característico de la piel del limón, y además lo consigue en un tiempo menor que los limones sin tratamiento (Zhang and Zhou, 2019). Cui et al (2020) comprobaron el mismo efecto sobre flores ornamentales observando también cambios significativos de color en el producto.

El etileno se emplea principalmente para acelerar la maduración en aquellas frutas que son sensibles a él, como las naranjas o las peras (Cocetta y Natalini, 2022). Al igual que el ethephon, el etileno está registrado en la EPA como regulador de crecimiento de las plantas y herbicida. La Agencia no considera necesario establecer un máximo de consumo, ya que no supone un riesgo para el ser humano o los animales mamíferos.

El etileno es antagonizado por el ethephon, que lo bloquea impidiendo que llegue a sus receptores y ejerza su función. Los estudios de Wang corroboran que el tratamiento con etileno induce mecanismos de defensa en frutas y hortalizas, mejora las propiedades antioxidantes, retrasa el deterioro de la calidad durante el almacenamiento, y mejora las propiedades antioxidantes bióticas y abioticas de las plantas (Wang et al., 2023).

Los hallazgos indican que la aplicación de etileno tiene un efecto notable en la inhibición del desarrollo de microorganismos durante las fases tempranas del almacenamiento, pero favorece su proliferación en etapas posteriores. Se observa específicamente un aumento significativo en la población de bacterias lácticas (Li et al., 2019).

Lafuente et a (2014), evaluaron el efecto de tratamientos con etileno sobre el desarrollo de daños por frío y las lesiones que se suelen producir en las naranjas cuando se almacenan entre 1 y 12 °C. Se aplicó un tratamiento de etileno (2uL/L) sobre naranjas con una humedad relativa del 90% se dividieron en dos grupos según la temperatura de almacenaje: 2 y 12°C, respectivamente ellos autores comprobaron que el tratamiento con etileno consiguió inhibir el desarrollo de estos tipos de lesiones. Sí se apreció en el grupo a 2°C que cuanto más largo era el tiempo de almacenamiento era más probable la aparición de unas manchas en la piel, sin efectos negativos en la propia fruta más que un ligero cambio de sabor en la pulpa y una mayor acumulación de flavonoides

También se ha empleado el etileno para evitar el oscurecimiento de la piel de las peras (Ma et al., 2017). El estudio se llevó a cabo con peras de la variedad Huangguan, que antes de ser recolectada o al principio de su maduración suele desarrollar manchas de color pardo. Los investigadores dividieron los frutos en varios lotes y los trataron con etileno a concentraciones de 0.70–1.28 y 1 μ L/L a 0 °C. Con estas concentraciones el porcentaje de incidencia del oscurecimiento en la piel bajó de un 73,8% a un 6,8%, mientras que si se aplica una concentración de 5 μ L/L desaparece completamente. Además, este último tratamiento aumenta la actividad de la catalasa, la ascorbato peroxidasa y la superóxido dismutasa, aumentando su capacidad antioxidante, y reduciendo la actividad de la polifenol oxidasa y la peroxidasa, que son las principales enzimas responsables del pardeamiento (Ma et al., 2017).

Además de mediante tratamientos gaseosos, el etileno también puede ser aplicado aplicando otro tipos de métodos como es el uso de microburbujas de etileno. Pongprasert et al (2020) demostraron que la aplicación de microburbujas durante sólo 10 minutos es capaz de madurar los plátanos de forma similar a la técnica convencional, (tratamiento gaseoso con etileno), que necesita días. La inmersión en microburbujas consiguió una rápida degradación de la clorofila, acelerando el cambio de color, la producción del etileno y aumentando la respiración

Por último, algunos estudios también han comprobado el efecto del etileno sobre frutas no climatéricas, como es el caso de la uva, (Becatti et al, 2014). En este caso, las uvas fueron tratadas con una concentración de 1000 ppm de etileno en aire durante 36 horas, a una temperatura entre los 15 y 20 °C, y una humedad del 40 al 65 %.

Los resultados demostraron que la cantidad de en la piel de las uvas aumentó, influyendo de forma notable en el color posterior del vino. Asimismo, se observó un incremento la degradación de la piel de los granos de uva por acción enzimática, facilitando la liberación de fenoles y aromas en la maduración del vino. Así pues, el etileno puede afectar a las uvas y al vino que se obtiene de estas, aunque su efecto no es igual para todas las variantes, de modo que es algo pendiente de estudio (Becatti et al., 2014; Xiao et al., 2022).

5.2 Aplicación de óxido nítrico para retrasar la etapa de senescencia en frutas

En los últimos tiempos, el NO ha ganado relevancia como un compuesto emergente que contribuye a prolongar la vida útil de las frutas después de la cosecha. Está implicado en distintos mecanismos de respuesta de las plantas al estrés (Li, Yu y Liao, 2022). Esto se debe a su capacidad para influir en procesos fisiológicos, como la maduración de la fruta, así como en las respuestas de adaptación frente a condiciones estresantes (Buet et al., 2021).

El NO desempeña un papel importante en el proceso de maduración y en la inhibición del proceso de senescencia en frutos climatéricos y no climatéricos.

Sahu et al (2020) dan en su trabajo sobre la guayaba un ejemplo de la función que tiene el NO en un fruto climatérico. Después de ser cosechada, la fruta madura y se ablanda rápidamente. Se debe a que aumenta su respiración, produce más etileno y tiene mucha actividad metabólica, lo que provoca su deterioro. No puede mantenerse fresca por más de 3 días a temperatura ambiente. Se ablanda demasiado y se vuelve harinosa, lo que la hace inservible para la venta. Además, la fruta es muy susceptible a los golpes y fácilmente atacada por microrganismos debido a su piel delgada y suave (Sahu, Barman y Singh, 2020). En el estudio se aplicaron tratamientos de inmersión durante cinco minutos en un donante de NO, nitroprusiato sódico, con concentraciones 0,5, 1 y 1,5 mM y los frutos fueron almacenados a 20 °C. De los tres tratamientos, el que mejores resultados mostró en todos los campos fue el de concentración 1mM. Tras el mismo, la pérdida de peso era de un 16% y la de clorofilas de un 53% comparada con el 78% de la muestra control. En ambos casos ocurre que el NO reduce la actividad de enzimas que degradan tanto la pared celular, provocando la pérdida de humedad y, por tanto, de peso, como la clorofilasa que degrada la clorofila. Estos cambios aumentan la vida útil y reducen la cantidad de fruta que se pierde.

Como ejemplo de la actividad del NO sobre las frutas no climatéricas, Zhang et al (2019) estudian su efecto sobre la uva de mesa *Vitis vinifera*, cuya senescencia está muy relacionada con las especies reactivas de oxígeno (Zhang et al., 2019). La tratan con una suspensión de 300 μ L/L en aire entre 0 y 5 °C durante dos horas, y posteriormente se almacena durante 60 días

con una humedad relativa de 90% a 0 °C. Despues de 10 días, las uvas tratadas con NO perdieron menos peso y mostraron menos manchas que las uvas no tratadas. Al final del período de almacenamiento, las uvas no tratadas perdieron un 133,82% más de peso y tuvieron un 34,20% más de manchas que las tratadas. Además, el NO ayudó a prevenir la podredumbre de las uvas durante los primeros 30 días y disminuyó la actividad de enzimas que degradan la pared celular y el metabolismo.

Es importante tener en cuenta que el NO, al ser una molécula reguladora de señales, juega un papel en la inhibición de la producción de etileno en eventos que prolongan la vida útil de las frutas (Li, Yu y Liao, 2022).

El efecto que puede tener el NO a gran escala no se conoce de manera completa, por la dificultad que presenta aplicarlo en grandes extensiones de cultivo debido a la necesidad de cámaras de fumigación y tuberías especiales. No obstante, a pesar de ello se acepta que la adición exógena de NO como tratamiento poscosecha puede prolongar la vida de diferentes frutas y verduras (Pols et al., 2022; zang et al., 2016).

5.3. Avances tecnológicos y nuevas herramientas para el control de la maduración y senescencia de frutas

La complejidad de los procesos de maduración y las reacciones implicadas ha motivado la investigación sobre métodos alternativos, que permitan una comprensión más completa de la regulación y la función de los mecanismos moleculares encargados de la maduración de las frutas, con objeto de estudiar cómo aumentar su vida útil y mantener su calidad poscosecha (Wee et al., 2023).

Una de las tecnologías que se emplean es la imagen por resonancia magnética, un método no invasivo ni destructivo que permite visualizar y examinar el interior de la fruta. Proporciona imágenes detalladas de las estructuras internas de la fruta, desde la piel hasta el núcleo dentro de la semilla (Fyfe et al., 2023).

El uso de esta tecnología ha permitido llegar a diferenciar hasta cinco estados de maduración en ciruelas verdes y seis en tomates. En el caso de las ciruelas están diferenciados como: M1, con los tamaños más pequeños; M2, con un tamaño medio; M3, con el mayor tamaño hasta el momento y compartiendo color verde intenso con las anteriores; M4, con color amarillo y ya en un punto comestible; y M5, de color amarillento pero ya en estado de sobremaduración (Fyfe et al., 2023). En el caso de los tomates, los estados se diferenciaron por el color: green, breaker, turning, pink, light red, and red. Su maduración está asociada a cambios químicos y de

estructura interna que son difíciles de cuantificar durante el proceso. Sin embargo, la señal de las imágenes de resonancia permite ver los cambios morfológicos que se producen en el tejido con la maduración de los frutos (Baek et al., 2020).

En ambos casos la resonancia permite diferenciar claramente las partes de la fruta, identificando así los cambios que se producen durante la maduración. Estos resultados indican que el uso de la resonancia magnética para la medición no destructiva de la madurez de los productos agrícolas es posible. Además, dado que proporciona información detallada interna, es posible caracterizar los defectos internos y otros factores de calidad (Fyfe et al., 2023; Baek et al., 2020).

Otro objetivo es poder diferenciar si las frutas han sido maduradas de forma natural o artificial. Esto se puede llevar a cabo de varias maneras, por ejemplo, mediante la detección de compuestos químicos que estén directamente relacionados con la maduración de alguna fruta concreta, como la 5-dimetil-4-hidroxi-3(2 H) furanona (DHF) propia del mango (Ghatak et al., 2021). Es necesario un polímero impregnado en DHF unido a un sensor que permita captar los compuestos volátiles relacionados para determinar el estado de maduración del mango. Es fundamental que el polímero esté bien impregnado y preparado para reconocer el compuesto, así como que los sensores estén calibrados para poder reconocerlo entre todos los volátiles que pueden aparecer.

Otra forma sería el análisis mediante imagen del cambio de color de las frutas al aplicar un compuesto que reacciona con el almidón y se vuelve de color negro azulado si la fruta ha sido madurada artificialmente (Sreeraj et al., 2020; Shelke et al., 2023). En estos casos es necesario un compuesto químico que reaccione con las frutas y produzca un cambio de color que se pueda analizar a través de programas de ordenador o análisis de imagen. Sreeraj et al. (2020) emplean carburo de calcio, que al reaccionar con el almidón produce el cambio de color referido. Para detectar este cambio es necesario enfocar la pieza de fruta con una cámara, de manera que se pueda observar la reacción para clasificarla según una paleta de colores específica.

Para desarrollar un modelo comparable con los sistemas actuales se ha diseñado una aplicación Android que acepta la entrada de imágenes de frutas. No obstante, es preciso tener en cuenta que es esencial tomar la foto de la fruta sobre un fondo liso antes de comenzar el procesamiento de la imagen, ya que de lo contrario el resultado del proceso de detección puede variar significativamente, y además hay que seleccionar la parte de la fruta que no

tenga elementos extraños mientras se capturan las imágenes (Shelke et al., 2023; Vélez-Rivera et al., 2013).

En la actualidad, la clasificación de la cosecha de fruta de acuerdo con el grado de maduración se realiza manualmente, lo que resulta ineficiente y susceptible de errores humanos, con pérdidas de hasta el 30%. Uno de los principales indicadores de progresión de la madurez en las plantas es el cambio de color, esto sugiere que los análisis de imagen podrían ser una alternativa más efectiva para clasificarla. La visión artificial ha surgido como sustituto de las inspecciones ópticas en varios sistemas de clasificación agrícola debido a su gran precisión, consistencia y rapidez.

Estos hallazgos coinciden con los de Cho and S. Koseki (2021), y Shuprajhaa et al., (2023) quienes demostraron que las propiedades del color de la piel son más apropiadas para distinguir los diferentes estados de madurez del plátano mediante técnicas de imagen óptica, en comparación con el complicado cálculo de las cualidades locales de textura y forma (Cho & Koseki, 2021; Shuprajhaa et al., 2023).

Otro ejemplo es la clasificación de chirimoyas en cinco estados de maduración diferentes: 0, 25, 50, 75 y 100%. A pesar de no haber diferencias notables en las cualidades físicas, las propiedades químicas y las características de las imágenes difirieron sustancialmente durante la maduración (Wakchaure et al., 2024).

Por ultimo, también se emplean técnicas de atmósfera controlada. Como ejemplo, la maduración de kiwis en una atmósfera con 30 % de oxígeno y 70 % de nitrógeno, a 23 °C. Con este tratamiento se consiguió acelerar la maduración de la fruta y mantener sus características óptimas para consumo en 7 días, mientras que la fruta control, sin atmósfera controlada y a temperatura ambiente, tardó 42. Esto ocurre por un aumento en la velocidad de respiración y en la producción de etileno (Chai et al., 2022).

6. Conclusiones

- El etileno no solo es capaz de acelerar la maduración, sino que también mejora las propiedades antioxidantes y las características de calidad comercial del fruto. Ello resulta crucial para mantener la calidad de las frutas durante su transporte y almacenamiento y

conseguir una adecuada ventana de recolección y comercialización. Normalmente es aplicado en forma gaseosa, pero también se están optimizando otro tipo de tratamientos como la aplicación de microburbujas.

-Los tratamientos de etileno más frecuentemente empleados se aplican a unas dosis de 5 a 1000 ppm durante un rango de tiempos de entre 8 y 36 h, a 20 °C. - Los tratamientos de maduración con ethephon son efectivos en diferentes frutas, a concentraciones de entre 500 y 1000 ppm. Como ejemplo, resulta particularmente eficaz en tomates y limones, mejorando su apariencia y vida útil poscosecha

- El NO actúa de manera efectiva inhibiendo la producción de etileno y reduciendo la actividad de enzimas degradativas. Ello resulta fundamental para mantener y prolongar la frescura y calidad de las frutas. - Se ha comprobado la eficacia del óxido nítrico en el retraso de la senescencia de algunas frutas climatéricas como puede ser la guayaba y de otras no climatéricas, como es el caso de la uvas. En este último caso, la aplicación de NO permitió reducir la deshidratación del raquis y la aparición de manchas en los granos.

- Aunque el uso de NO es prometedor, los desafíos logísticos para su aplicación a gran escala deben ser abordados. La necesidad de infraestructura especializada puede ser una barrera, pero su potencial para mejorar la vida útil de las frutas lo convierte en un área importante de investigación y desarrollo.

- La imagen por resonancia magnética ofrece una manera avanzada y precisa de estudiar la maduración de frutas. Al proporcionar imágenes detalladas de las estructuras internas, permite identificar y comprender mejor los cambios que ocurren durante la maduración, ayudando a optimizar los procesos de almacenamiento y transporte.

- La adopción de tecnologías de visión artificial en la clasificación de frutas puede reducir significativamente las pérdidas y aumentar la eficiencia. Esta tecnología ofrece una precisión y consistencia superiores a las inspecciones manuales, mejorando la gestión postcosecha y la comercialización de frutas.

Conclusions

- Ethylene not only accelerates ripening but also enhances the antioxidant properties and commercial quality characteristics of the fruit. This is crucial for maintaining the quality of fruits during transportation and storage and for achieving an appropriate harvesting and marketing window. It is usually applied in gaseous form, but other treatment methods, such as the application of microbubbles, are also being optimized.

- The most commonly used ethylene treatments are applied at doses ranging from 5 to 1000

ppm for periods of 8 to 36 hours at 20°C.

- Ripening treatments with ethephon are effective on various fruits at concentrations between 500 and 1000 ppm. For example, it is particularly effective in tomatoes and lemons, improving their appearance and post-harvest shelf life.
- NO (nitric oxide) acts effectively by inhibiting ethylene production and reducing the activity of degradative enzymes. This is fundamental for maintaining and prolonging the freshness and quality of fruits.
- The efficacy of nitric oxide in delaying the senescence of some climacteric fruits, such as guava, and non-climacteric fruits, such as grapes, has been proven. In the latter case, the application of NO helped reduce dehydration of the rachis and the appearance of spots on the berries.
- Although the use of NO is promising, logistical challenges for its large-scale application need to be addressed. The requirement for specialized infrastructure may be a barrier, but its potential to improve the shelf life of fruits makes it an important area for research and development.
- Magnetic resonance imaging (MRI) offers an advanced and precise way to study fruit ripening. By providing detailed images of internal structures, it allows for better identification and understanding of the changes that occur during ripening, helping to optimize storage and transportation processes.
- The adoption of machine vision technologies in fruit sorting can significantly reduce losses and increase efficiency. This technology offers superior precision and consistency compared to manual inspections, improving post-harvest management and the commercialization of fruits.

7. Valoración personal

El proceso de redactar este trabajo final ha sido sumamente enriquecedor. A través de la investigación y la profundización en el tema, he adquirido un conocimiento más sólido y

detallado. Durante este proceso he explorado diferentes perspectivas, teorías y enfoques, lo que ha ampliado mi comprensión general.

Una parte fundamental del trabajo ha sido la búsqueda exhaustiva de artículos científicos: realicé investigaciones minuciosas en bases de datos académicas y bibliotecas digitales para encontrar y evaluar las fuentes relevantes, aprendí a discernir entre estudios rigurosos y aquellos con limitaciones metodológicas.

En resumen, este trabajo final no solo representa el cierre de un ciclo académico, sino también una oportunidad para crecer intelectualmente. La investigación y las búsquedas exhaustivas han sido fundamentales para mi desarrollo como estudiante y profesional.

Quiero dar las gracias a Esther Arias, que me ha orientado y apoyado en todo momento durante la elaboración de este trabajo de fin de grado, y a mi madre y mis amigos, que siempre me han animado a avanzar.

Bibliografía

- .- Baek, S., Lim, J., Lee, J. G., McCarthy, M. J., & Kim, S. M. (2020). Investigation of the Maturity Changes of Cherry Tomato Using Magnetic Resonance Imaging. *Applied Sciences*, 10(15), 5188. <https://doi.org/10.3390/app10155188>
- .- Bucatti, E., Genova, G., Ranieri, A. y Tonutti, P., (2014). Postharvest treatments with ethylene on Vitis vinifera (cv Sangiovese) grapes affect berry metabolism and wine composition. *Food Chemistry* [en línea]. **159**, 257–266. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.foodchem.2014.02.169
- .- Buet, A., Steelheart, C., Perini, M. A., Galatro, A., Simontacchi, M. y Gergoff Grozeff, G. E., (2021). Nitric Oxide as a Key Gasotransmitter in Fruit Postharvest: An Overview. *Journal of Plant Growth Regulation* [en línea]. [Consultado el 14 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1007/s00344-021-10428-w
- .- Chai, J., Wang, Y., Liu, Y., Gu, Z., & Liu, Z. (2022). High O₂/N₂ controlled atmosphere accelerates postharvest ripening of 'Hayward' kiwifruit. *Scientia Horticulturae*, 300, 111073. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2022.111073>
- .- Chen, J., Liu, F., Ismail, B. B., Wang, W., Xu, E., Pan, H., Ye, X., Liu, D. y Cheng, H., (2022). Effects of ethephon and low-temperature treatments on blood oranges (*Citrus sinensis* L. Osbeck): anthocyanin accumulation and volatile profile changes during storage. *Food Chemistry* [en línea]. 133381. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133381
- .- Cho, B.-H., & Koseki, S. (2021). Determination of banana quality indices during the ripening process at different temperatures using smartphone images and an artificial neural network. *Scientia Horticulturae*, 288, 110382. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2021.110382>
- .- Coccetta, G. y Natalini, A., (2022). Ethylene: Management and breeding for postharvest quality in vegetable crops. A review. *Frontiers in Plant Science* [en línea]. **13**. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.3389/fpls.2022.968315
- .- Cui, Y., Zhai, Y., Flaishman, M., Li, J., Chen, S., Zheng, C. y Ma, H., (2020). ETHEPHON induces coordinated ripening acceleration and divergent coloration responses in fig (*Ficus carica* L.) flowers and receptacles. *Plant Molecular Biology* [en línea]. [Consultado el 14 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1007/s11103-020-01092-x
- .- Fan D, Wang W, Hao Q and Jia W (2022) Do Non-climacteric Fruits Share a Common Ripening Mechanism of Hormonal Regulation? *Front. Plant Sci.* 13:923484. doi: 10.3389/fpls.2022.923484
- .- Figueiroa, C. R., Jiang, C.-Z., Torres, C. A., Fortes, A. M., & Alkan, N. (2021). Editorial: Regulation of Fruit Ripening and Senescence. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.711458>

- .- Fyfe, S., Smyth, H. E., Schirra, H. J., Rychlik, M., Sultanbawa, Y., & Kurniawan, N. D. (2023). Physical properties and magnetic resonance imaging of the Australian green plum (*Buchanania obovata*) through maturity and ripening and across locations. *Postharvest Biology and Technology*, 205, 112494. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112494>
- .- Gamrasni, D., Feldmesser, E., Ben-Arie, R., Raz, A., Tabatznik Asiag, A., Glikman, M., Aharoni, A., & Goldway, M. (2020). Gene Expression in 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treated Tomatoes during Pre-Climacteric Ripening Suggests Shared Regulation of Methionine Biosynthesis, Ethylene Production and Respiration. *Agronomy*, 10(11), 1669. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111669>
- .- Gergoff Grozeff, G. E., Alegre, M. L., Senn, M. E., Chaves, A. R., Simontacchi, M. y Bartoli, C. G., (2017). Combination of nitric oxide and 1-MCP on postharvest life of the blueberry (*Vaccinium spp.*) fruit. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. 133, 72–80. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.06.012
- .- Ghatak, B., Banerjee, S., Ali, S. B., Das, N., Tudu, B., Pramanik, P., Mukherji, S., & Bandyopadhyay, R. (2021). Development of a low-cost portable aroma sensing system for identifying artificially ripened mango. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112964. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112964>
- .- Islam, M. N., Mursalat, M. y Khan, M. S., (2016). A review on the legislative aspect of artificial fruit ripening. *Agriculture & Food Security* [en línea]. 5(1). [Consultado el 14 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1186/s40066-016-0057-5
- .- Jiang, L., Kang, R., Zhang, L., Jiang, J., & Yu, Z. (2015). Differential protein profiles of postharvest *Gynura bicolor* D.C leaf treated by 1-methylcyclopropene and ethephon. *Food Chemistry*, 176, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.081>
- .- Kang, R., Zhang, L., Jiang, L., Yu, M., Ma, R., & Yu, Z. (2016). Effect of postharvest nitric oxide treatment on the proteome of peach fruit during ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 112, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.08.017>
- .- Ko, D. K., & Brandizzi, F. (2020). Network-based approaches for understanding gene regulation and function in plants. *The Plant Journal*. doi:10.1111/tpj.14940
- .- Kou, J., Wei, C., Zhao, Z., Guan, J. y Wang, W., (2020). Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene treatments on physiological changes and ripening-related gene expression of 'Mopan' persimmon fruit during storage. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. 166, 111185. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2020.111185
- .- Lafuente, M. T., Alférez, F. y Romero, P., (2014). Postharvest ethylene conditioning as a tool to reduce quality loss of stored mature sweet oranges. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. 94, 104–111. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.03.011
- .- Li, C., Yu, W. y Liao, W., (2022). Role of Nitric Oxide in Postharvest Senescence of Fruits. *International Journal of Molecular Sciences* [en línea]. 23(17), 10046. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.3390/ijms231710046
- .- Li, T., Zhang, J., Gao, X., Chen, J., Zheng, Y., Gao, Y. y Qiu, L., (2019). The molecular mechanism for the ethylene regulation of postharvest button mushrooms maturation and senescence. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. 156, 110930. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.110930
- .- Liu, Y., Chen, T., Tao, N., Yan, T., Wang, Q., & Li, Q. (2023). Nitric Oxide Is Essential to Keep the Postharvest Quality of Fruits and Vegetables. *Horticulturae*, 9(2), 135. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020135>
- .- Ma, Y., Yang, M., Wang, J., Jiang, C.-Z. y Wang, Q., (2017). Application of Exogenous Ethylene Inhibits Postharvest Peel Browning of 'Huangguan' Pear. *Frontiers in Plant Science* [en línea]. 7. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.3389/fpls.2016.02029
- .- Maduwanthi, S. D. T., & Marapana, R. A. U. J. (2019). Induced Ripening Agents and Their Effect on Fruit Quality of Banana. *International Journal of Food Science*, 2019, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/2520179>

- .- Martínez-González, M. E., Balois Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M. A., Palomino-Hermosillo, Y. A., & López-Gúzman, G. G. (2017). Postcosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (19), 4075. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.674>
- .- Moniruzzaman, M., Khatoon, R., Hossain, M., Rahman, M. y Alam, S., (2016). Influence of ethephon on ripening and quality of winter tomato fruit harvested at different maturity stages. *Bangladesh Journal of Agricultural Research* [en línea]. 40(4), 567–580. [Consultado el 14 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.3329/bjar.v40i4.26932
- .- Paul, V., Pandey, R. y Srivastava, G. C., (2011). The fading distinctions between classical patterns of ripening in climacteric and non-climacteric fruit and the ubiquity of ethylene—An overview. *Journal of Food Science and Technology* [en línea]. 49(1), 1–21. [Consultado el 7 de febrero de 2024]. Disponible en: doi: 10.1007/s13197-011-0293-4
- .- PAYASI, A., & SANWAL, G. G. (2010). RIPENING OF CLIMACTERIC FRUITS AND THEIR CONTROL. *Journal of Food Biochemistry*, 34(4), 679–710. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2009.00307.x>
- .- Pols, S., Van de Poel, B., Hertog, M. L. A. T. M. y Nicolaï, B. M., (2022). The regulatory role of nitric oxide and its significance for future postharvest applications. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. 188, 111869. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.111869
- .- Pongprasert, N., Srilaong, V. y Sugaya, S., (2020). An alternative technique using ethylene micro-bubble technology to accelerate the ripening of banana fruit. *Scientia Horticulturae* [en línea]. 272, 109566. [Consultado el 14 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.scienta.2020.109566
- .- Sahu, S. K., Barman, K. y Singh, A. K., (2020). Nitric oxide application for postharvest quality retention of guava fruits. *Acta Physiologiae Plantarum* [en línea]. 42(10). [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1007/s11738-020-03143-8
- .- Seymour, G., Giovannoni, J., Poole, M., & Tucker, G. A. (2013). Molecular Biology and Biochemistry of Fruit Ripening. Wiley & Sons, Limited, John.
- .- Shuprajhaa, T., Mathav Raj, J., Paramasivam, S. K., Sheeba, K. N., & Uma, S. (2023). Deep learning based intelligent identification system for ripening stages of banana. *Postharvest Biology and Technology*, 203, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112410>
- .- Sreeraj, M., Joy, J., Kuriakose, A., Sujith, M. R., Vishnu, P. K., & Unni, H. (2020). CLadron*: AI assisted device for identifying artificially ripened climacteric fruits. *Procedia Computer Science*, 171, 635–643. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.069>
- .- Vélez-Rivera, N., Blasco, J., Chanona-Pérez, J., Calderón-Domínguez, G., de Jesús Perea-Flores, M., Arzate-Vázquez, I., Cubero, S., & Farrera-Rebollo, R. (2013). Computer Vision System Applied to Classification of “Manila” Mangoes During Ripening Process. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 1183–1194. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1142-4>
- .- Wakchaure, G. C., Nikam, S. B., Barge, K., Kumar, S., Meena, K. K., Nagalkar, V. J., Choudhari, J. D., Kad, V. P., & Reddy, K. S. (2023). Maturity Stages Detection Prototype Device for Classifying Custard Apple (*Annona squamosa* L) Fruit Using Image Processing Approach. *Smart Agricultural Technology*, 100394. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100394>
- .- Wang, H., Chen, J., Yi, Y., Wang, L., Hou, W., Ai, Y., Wang, H. y Min, T., (2023). Regulation and mechanism of ethylene treatment on storage quality of fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root slices. *Scientia Horticulturae* [en línea]. 313, 111900. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.scienta.2023.111900
- .- Wee, C.-C., Subbiah, V. K., Arita, M., & Goh, H.-H. (2023). The applications of network analysis in fruit ripening. *Scientia Horticulturae*, 311, 111785. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111785>
- .- Xiao, X., Shi, L., Dong, W., Jin, S., Liu, Q., Chen, W., Cao, S. y Yang, Z., (2022). Ethylene promotes carotenoid accumulation in peach pulp after harvest. *Scientia Horticulturae* [en línea]. 304, 111347. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.scienta.2022.111347

- .- Xu, Y., Yi, Y., Ai, Y., Hou, W., Wang, L., Wang, H. y Min, T., (2023). Ethephon and 1-methylcyclopropene regulate storage quality and browning of fresh-cut Chinese water chestnuts. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. **200**, 112331. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2023.112331
- .- Yongfeng Guo (ed.), *Plant Senescence: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology*, vol. 1744, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7672-0_7, © Springer Science+Business Media, LLC 2018
- .- Zhang, P. y Zhou, Z., (2019). Postharvest ethephon degreening improves fruit color, flavor quality and increases antioxidant capacity in 'Eureka' lemon (*Citrus limon* (L.) Burm. f.). *Scientia Horticulturae* [en línea]. **248**, 70–80. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.scientia.2019.01.008
- .- Zhang, W., Cao, J., Fan, X. y Jiang, W., (2020). Applications of nitric oxide and melatonin in improving postharvest fruit quality and the separate and crosstalk biochemical mechanisms. *Trends in Food Science & Technology* [en línea]. **99**, 531–541. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.tifs.2020.03.024
- .- Zhang, Z., Xu, J., Chen, Y., Wei, J. y Wu, B., (2019). Nitric oxide treatment maintains postharvest quality of table grapes by mitigation of oxidative damage. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. **152**, 9–18. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.01.015
- .- Zhu, L., Yang, R., Sun, Y., Zhang, F., Du, H., Zhang, W., Wan, C. y Chen, J., (2021). Nitric oxide maintains postharvest quality of navel orange fruit by reducing postharvest rotting during cold storage and enhancing antioxidant activity. *Physiological and Molecular Plant Pathology* [en línea]. **113**, 101589. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.pmpp.2020.101589.- Zhu, X., Shen, L., Fu, D., Si, Z., Wu, B., Chen, W. y Li, X., (2015). Effects of the combination treatment of 1-MCP and ethylene on the ripening of harvested banana fruit. *Postharvest Biology and Technology* [en línea]. **107**, 23–32. [Consultado el 13 de noviembre de 2023]. Disponible en: doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.04.010