



MELATONINA: BIOESTIMULANTE EN LA MITIGACIÓN DE ESTRESSES ABIÓTICOS Y LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS

MELATONIN: A BIOSTIMULANT IN ABIOTIC STRESSES MITIGATION AND CROP PRODUCTION

David Trujillo-García*, Ebandro Uscanga-Mortera, Carlos Trejo, F. Víctor Conde-Martínez, J. Rodolfo García-Nava y José L. Díaz-Núñez

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Botánica, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (trujillo.david@colpos.mx)

RESUMEN

La melatonina (N-acetyl-5-metoxitriptamina), una indolamida conocida por su función como neurohormona en animales, también se encuentra de forma natural en muchas especies vegetales, donde juega un papel crucial en procesos fisiológicos. Su aplicación puede considerarse una estrategia segura y efectiva para mejorar el desarrollo de especies cultivadas en sus diferentes etapas fenológicas, incluso bajo estreses abióticos. Esta revisión tiene como objetivo recopilar y analizar estudios que describen los efectos de la aplicación de melatonina en el desarrollo de especies cultivadas. Aunque la melatonina representa una alternativa promisorio como bioestimulante para reducir los efectos adversos de diferentes estreses abióticos en la producción sostenible de cultivos, aun se requiere más investigación. La presencia de resultados contradictorios entre especies y concentraciones indica que aún no se dispone de una tecnología estandarizada para su uso agrícola a gran escala.

Palabras clave: bioestimulante en cultivos, desarrollo reproductivo, desarrollo vegetativo, estrés abiótico, N-acetyl-5-metoxitriptamina.

SUMMARY

Melatonin (N-acetyl-5-methoxytryptamine), an indoleamide known for its function as a neurohormone in animals, is also naturally present in many plant species, where it plays a crucial role in physiological processes. Its application is considered a safe and effective strategy to enhance the development of cultivated species at various phenological stages, even under abiotic stress conditions. This review aims to compile and analyze studies describing the effects of melatonin application on the development of cultivated species. While melatonin represents promising alternative as a biostimulant to reduce the adverse effects of various abiotic stresses in sustainable crop production, it still requires further research. Contradictory results across species and concentrations indicate that a standardized technology for large-scale agricultural use is not yet available.

Index words: Abiotic stress, crop biostimulant, N-acetyl-5-methoxytryptamine, reproductive development, vegetative development.

INTRODUCCIÓN

La melatonina (N-acetyl-5-metoxitriptamina) es un derivado del triptófano que se identificó en la glándula pineal de bovinos por primera vez en 1958, se clasifica como una indolamida que actúa como una neurohormona en animales; además, en 1994 dicha molécula se encontró en diversas especies vegetales y en 2004 se le denominó como fitomelatonina, para diferenciarla de la encontrada en animales (Wang *et al.*, 2022a). En la actualidad, se ha registrado que especies de más de 20 familias botánicas contienen melatonina en semillas, raíces, hojas, flores, frutos, brotes y bulbos (Mannino *et al.*, 2021).

La N-acetyl-5-metoxitriptamina regula el metabolismo del ácido indolacético (AIA), las giberelinas (GA), el ácido abscísico (ABA), las citoquininas (CK), el etileno (ET), el ácido salicílico (AS), el ácido jasmónico (AJ), las estrigolactonas (Sr), los brasinoesteroides (Br) y del óxido nítrico (Arnao *et al.*, 2022); asimismo, optimiza el transporte de electrones entre los fotosistemas II y I, lo que favorece el metabolismo primario, en particular el ciclo de Calvin-Benson y el ciclo de Krebs, y promueve la asimilación de carbono mediante el incremento en los niveles del trifosfato de adenosina. Adicionalmente, ejerce una función antioxidante al mitigar la acumulación de especies reactivas de oxígeno y de nitrógeno (Aijaz *et al.*, 2025). Por lo anterior, la melatonina se considera una molécula multirreguladora que desempeña un papel clave en diversos procesos y etapas del desarrollo de las plantas, como la germinación, el crecimiento de raíces y vástagos, la maduración y la calidad de los frutos, y la tolerancia a estreses abióticos (Pan *et al.*, 2023).

En los últimos años, debido a que la N-acetyl-5-metoxitriptamina es una molécula producida por plantas

y animales, y su aplicación en concentraciones altas no produce toxicidad, se ha propuesto como una alternativa para estimular procesos fisiológicos de especies vegetales de importancia económica (Pan *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022a).

El objetivo de esta revisión es recopilar y analizar estudios que describen los efectos de la aplicación de melatonina en el desarrollo de especies cultivadas, en diferentes etapas fenológicas y en sus respuestas a estreses abióticos, con el fin de aportar elementos que respalden su implementación en la producción sostenible de cultivos. Se destaca que, si bien la melatonina muestra un potencial significativo, su aplicación aún no puede considerarse como una tecnología agrícola consolidada, debido a la variabilidad en las respuestas observadas y a la falta de protocolos estandarizados.

MECANISMOS DE REGULACIÓN HORMONAL DE LA MELATONINA EN PLANTAS

Para entender los efectos estimulantes de la N-acetyl-5-metoxitriptamina es importante conocer los mecanismos moleculares y fisiológicos que desencadena. La melatonina actúa como un modulador clave de los niveles endógenos y la señalización de fitohormonas, al establecer una red compleja de interacciones que determinan respuestas fisiológicas específicas en las plantas. Esta capacidad pleiotrópica se ejerce mediante el control transcripcional de genes involucrados en la biosíntesis, catabolismo y percepción hormonal, al tener una regulación efectiva en la homeostasis hormonal vegetal (Arnao *et al.*, 2022; Mannino *et al.*, 2021).

Las interacciones mencionadas regulan la expresión de genes relacionados con el metabolismo y transporte de AIA, lo que promueve la formación de raíces laterales y adventicias; además, inducen la biosíntesis de GA y CK, lo que favorece la germinación y el crecimiento vegetativo. Su interacción con Br desempeña un papel clave en la protección y el mantenimiento de la integridad del aparato fotosintético, lo que contribuye a la regulación de la eficiencia fotosintética en distintas condiciones ambientales (Aijaz *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2022a).

En las plantas en estrés, la N-acetyl-5-metoxitriptamina determina los niveles de ABA al regular su biosíntesis y catabolismo durante procesos como la germinación y el cierre estomático; además, regula la expresión de genes involucrados en la síntesis y señalización del ET, al influir en la maduración de frutos y en la senescencia foliar; asimismo, en el sistema de defensa interactúa con el AS y AJ para activar genes que protegen a la planta de estreses abióticos y bióticos (Arnao *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2023).

En conjunto, la capacidad de la melatonina para modular múltiples vías hormonales muestra su versatilidad con el propósito de activar y coordinar respuestas a situaciones adversas en diferentes etapas fenológicas.

MELATONINA: UN BIOESTIMULANTE EN LA ETAPA VEGETATIVA

Germinación de semillas

La germinación involucra cambios físicos, bioquímicos, fisiológicos y morfológicos, mediante los cuales, el embrión reanuda su desarrollo para dar origen a una plántula. La aplicación de N-acetyl-5-metoxitriptamina contribuye a la reparación del ADN durante la germinación y, además, incrementa la tasa de germinación en semillas de diferentes cultivos, particularmente cuando se encuentran en condiciones de estreses abióticos (Liu *et al.*, 2023).

Esta molécula probablemente regula la expresión de genes relacionados con el catabolismo del ABA y el anabolismo de las GA, lo que contribuye a incrementar la actividad de las enzimas esenciales para la hidrólisis de las sustancias de reserva y el anabolismo de los compuestos necesarios para la reanudación del crecimiento del embrión (Arnao *et al.*, 2022).

La melatonina (10^{-4} a 10^{-6} M) aumentó la germinación en más de 10 % en semillas de *Gossypium hirsutum* L. y *Stevia rebaudiana* Bertoni (Simlat *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2019), mientras que no tuvo efecto en *Limonium bicolor* (Bunge) Kuntze y *Cucumis sativus* L. (Li *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2013). Además, concentraciones mayores de 10^{-3} M inhibieron la germinación en más de 50 % en *L. bicolor* y *C. melo* L. (Castañares y Bouzo, 2019; Li *et al.*, 2019).

En *C. melo* L., *C. sativus* y *L. bicolor* la N-acetyl-5-metoxitriptamina en concentraciones de 10^{-4} a 10^{-6} M inhibió el estrés salino (cloruro de sodio) y aumentó la germinación en más de 10 % al disminuir el daño oxidativo (Castañares y Bouzo, 2019; Zhang *et al.*, 2013), mientras que en *Zea mays* L. la melatonina (10^{-5} M) inhibió los efectos del estrés por metales (cobre) y bajas temperaturas (de -5 a 5 °C) al impedir que el porcentaje de germinación disminuyera (Li *et al.*, 2019).

Crecimiento de la raíz

El primer órgano embrionario que se desarrolla durante la germinación es la radícula, la cual es fundamental para el anclaje, la absorción y el transporte de agua y nutrientes (vías apoplástica y simplástica), lo cual favorece el desarrollo de la planta. La N-acetyl-5-metoxitriptamina modifica el crecimiento, acumulación de materia seca y

arquitectura de la raíz, de forma similar al efecto producido por el AIA (Pan *et al.*, 2023). Aunque ambas sustancias comparten un mismo precursor, la melatonina no participa de manera directa en la biosíntesis de AIA; sin embargo, la melatonina regula los niveles de AIA mediante el control transcripcional de genes involucrados en su metabolismo, transporte y homeostasis, tal como se ha mostrado en estudios realizados en mutantes deficientes en AIA (Wang *et al.*, 2022a).

En *Triticum aestivum* L., la N-acetyl-5-metoxitriptamina (10^{-4} y 10^{-5} M) incrementó la materia seca de la raíz de 20 a 40 % (Ye *et al.*, 2020). En *Oryza sativa* L. a concentraciones de 10^{-4} y 10^{-5} M redujo la longitud de la raíz principal de 10 a 15 %, pero incrementó el número y la longitud de las raíces secundarias en más de 25 % (Liang *et al.*, 2017). En *Medicago sativa* L. y *Brassica rapa* L. la melatonina (10^{-4} a 10^{-6} M) aumentó la formación de raíces secundarias de 40 a 70 % (Chen *et al.*, 2018; Teng *et al.*, 2022). En *Solanum lycopersicum* L. y *Malus prunifolia* (Willd.) Borkh, la concentración de 10^{-4} a 10^{-6} M de N-acetyl-5-metoxitriptamina estimuló la aparición de raíces adventicias de 30 a 40 % (Mao *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2022), efecto que nuestro grupo de trabajo corroboró con un incremento en el número de raíces adventicias en más de 40 % en *S. lycopersicum* con aplicaciones foliares y en sustrato en concentraciones de 10^{-4} y 10^{-5} M (resultados en proceso de publicación por nuestro laboratorio).

La melatonina (10^{-5} y 10^{-6} M) promueve el enraizamiento en más de 10 % en *Prunus avium* × *P. cerasus* y en *Punica granatum* L. cv. Wonderful (Sarropoulou *et al.*, 2012; Sarrou *et al.*, 2014); y en concentraciones mayores de 10^{-4} M inhibe en más del 50 % el crecimiento de raíces en *S. lycopersicum* y *P. avium* × *P. cerasus* (Sarropoulou *et al.*, 2012; Wen *et al.*, 2016).

La N-acetyl-5-metoxitriptamina mitigó (10^{-4} y 10^{-5} M) los efectos que produce el estrés hídrico, el metálico (cobre) y el salino en el crecimiento de la raíz y en la generación de raíces secundarias en *C. sativus* y *Actinidia chinensis* Planch., al aumentar la actividad antioxidante, reducir la acumulación de especies reactivas de oxígeno y mejorar el metabolismo de carbono (Cao *et al.*, 2018; Liang *et al.*, 2019).

Desarrollo del vástago

El tallo de la planta proporciona soporte, realiza fotosíntesis y transporta fotoasimilados desde las hojas hasta la raíz, contribuyendo al crecimiento de la planta. En este contexto, la aplicación de N-acetyl-5-metoxitriptamina incrementa la altura de la planta, el área foliar y el contenido de materia seca, al favorecer

el transporte de electrones entre los fotosistemas, el transporte de nutrientes y carbohidratos y al mantener el equilibrio entre el metabolismo del carbono y del nitrógeno (Aijaz *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2022a).

En *T. aestivum* y *Z. mays*, la melatonina (10^{-4} y 10^{-5} M) incrementó el área foliar y la materia seca en más de 25 % (Ahmad *et al.*, 2020; Ye *et al.*, 2020) y en *Ammi majus* L., *B. rapa* y *S. rebaudiana* en concentración de 10^{-4} a 10^{-6} M, aumentó la altura del tallo de 5 a 15 %, el área foliar en más de 10 % y la materia fresca y seca de 20 a 30 % (Teng *et al.*, 2022; Xiang *et al.*, 2020).

La N-acetyl-5-metoxitriptamina inhibió (10^{-4} y 10^{-5} M) los efectos adversos que producen el estrés hídrico (polietilenglicol), el salino y el metálico en el desarrollo del vástago de *C. sativus* y *G. hirsutum*, al incrementar la división celular, la tasa de fotosíntesis y el metabolismo de carbohidratos, de ácidos grasos y del ascorbato (Cao *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021). Farouk y Al-Amri (2019a) y Liang *et al.* (2019) determinaron que la aplicación de melatonina (10^{-3} a 10^{-5} M) en *A. chinensis* y *Salvia rosmarinus* Spenn. incrementó el área foliar de 5 a 15 % y la materia seca en más de 5 % en condiciones de estrés hídrico y metálico (arsénico).

MELATONINA: UN BIOESTIMULANTE EN LA ETAPA REPRODUCTIVA

Desarrollo de flores

La inducción a la floración es uno de los eventos más importantes en los antófitos, evento que marca el cambio de la fase vegetativa a la fase reproductiva, y en la cual influyen factores internos (hormonales y nutricionales) y externos (luz, temperatura, entre otros). En la floración, la aplicación de N-acetyl-5-metoxitriptamina juega un papel clave en la viabilidad y germinación de polen, en el tiempo a floración, el número de flores y la síntesis de compuestos volátiles esenciales para la atracción de polinizadores, al regular el metabolismo de GA, Sr y de metabolitos secundarios (Arnao *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022a).

En *A. majus* y *Hedychium coronarium* J. Koenig, la melatonina (10^{-3} y 10^{-4} M) incrementó el número de flores de 10 a 15 % y estimuló la síntesis de compuestos volátiles (Abbas *et al.*, 2021; Xiang *et al.*, 2020); sin embargo, en *Chenopodium rubrum* L. y *M. domestica* Borkh. disminuyó la floración en más de 20 % y la retrasó de tres a cinco días con concentraciones de 10^{-3} a 10^{-5} M (Kolář *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2019). Lo anterior demuestra que la respuesta a las aplicaciones de este compuesto tiene efectos específicos y dependientes de la especie.

La N-acetyl-5-metoxitriptamina en concentraciones de 10^{-3} a 10^{-6} M ha mostrado que inhibe los efectos negativos del estrés hídrico y de temperaturas altas (más de 30 °C) en la viabilidad y germinación del polen en *G. hirsutum* y *S. lycopersicum*, al regular el metabolismo de azúcares, inhibir la producción de especies reactivas de oxígeno y estimular la expresión de genes de proteínas de choque térmico (Hu et al., 2020; Qi et al., 2018).

Desarrollo de frutos

La aplicación de N-acetyl-5-metoxitriptamina incrementa el número, el peso y la calidad de frutos, al aumentar la actividad fotosintética, regular los balances nutricional y hormonal, además de la síntesis de otros compuestos primarios y secundarios (Pan et al., 2023; Wang et al., 2022a).

En *T. aestivum* y *Z. mays*, la melatonina (10^{-4} y 10^{-5} M) incrementó el rendimiento de grano en más de 15 % (Ahmad et al., 2020; Ye et al., 2020). En *Pyrus × bretschneideri* Rehder, *Vitis vinifera* L. y *Phoenix dactylifera* L., con concentraciones de 10^{-4} y 10^{-5} M, aumentó el rendimiento de frutos en más de 10 %, así como el contenido de azúcares, compuestos fenólicos y minerales esenciales (Fekry et al., 2022; Liu et al., 2019; Xia et al., 2021).

En *P. communis* L. y *P. avium*, la N-acetyl-5-metoxitriptamina (10^{-4} y 10^{-5} M) indujo partenocarpia y retrasó la maduración de los frutos en más de siete días (Liu et al., 2018; Tijero et al., 2019).

En *Fragaria × ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier, la melatonina (10^{-3} a 10^{-6} M) mitigó los efectos dañinos del estrés salino, adelantó la maduración de los frutos de dos a tres días, e incrementó el rendimiento en más de 5 %, al aumentar la actividad antioxidante (Zahedi et al., 2020).

LA MELATONINA EN LA MADURACIÓN Y PRESERVACIÓN DE FRUTOS EN POSTCOSECHA

La postcosecha comienza cuando el fruto es separado de la planta. En esta etapa, la N-acetyl-5-metoxitriptamina incrementa la calidad, prolonga la vida de anaquel de los frutos y mitiga los efectos dañinos de las temperaturas bajas (menores de 5 °C) durante el almacenaje (Pan et al., 2023). El efecto de esta molécula durante la postcosecha está relacionado con la regulación del metabolismo del ABA, ET y ON, al igual que el metabolismo del ácido shikímico y la actividad de enzimas relacionadas con lípidos, fenilpropanoides y antioxidantes (Arnao et al., 2022); además, actúa como una barrera que reduce la pérdida de agua y la

consecuente deshidratación de los frutos (Wang et al., 2022a).

La melatonina (10^{-3} a 10^{-8} M) retrasó la maduración en más de tres días y mejoró la calidad nutracéutica, el contenido de azúcares solubles y de compuestos fenólicos de los frutos en manzana (variedad Golden Delicious), *P. communis*, *F. × ananassa*, *Ziziphus jujuba* Mill., *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl., *P. avium*, *Vaccinium corymbosum* L. y *Musa acuminata* L., (Fan et al., 2022b; Magra y Petriccione, 2022; Wang et al., 2021).

En *V. vinifera*, la N-acetyl-5-metoxitriptamina (10^{-4} y 10^{-5} M) adelantó la maduración de los frutos en más de cinco días y mejoró su calidad nutricional, el contenido de azúcares solubles y de compuestos fenólicos (Wang et al., 2020).

En la preservación en frío de frutos, la melatonina (10^{-4} a 10^{-7} M) redujo los daños generados por este estrés, al prolongar la vida en almacenamiento y mantener la calidad nutricional en *S. lycopersicum*, *P. persica* Batsch cv. Hujing, *Mangifera indica* L. y *Psidium guajava* L. (Dong et al., 2021; Fan et al., 2022a; Menaka et al., 2024).

MELATONINA: UN BIOESTIMULANTE EN LA LONGEVIDAD FOLIAR

La N-acetyl-5-metoxitriptamina activa enzimas y moléculas con actividad antioxidante que pueden prolongar la vida de las hojas, al inducir la síntesis *de novo* y retardar la degradación de las clorofilas, así como modular el metabolismo del ET, AS y AJ (Arnao et al., 2022; Wang et al., 2022a); además, participa en el silenciamiento de genes asociados con el envejecimiento y la autofagia en células vegetales (Pan et al., 2023).

En *T. aestivum* y *Z. mays*, la melatonina (10^{-4} y 10^{-5} M) retrasó la senescencia de hojas en más de siete días e incrementó el contenido de clorofila (Ahmad et al., 2020; Ye et al., 2020), mientras que en *S. lycopersicum* L., *Actinidia deliciosa* (L) Merr. y *Gardenia jasminoides* J. Ellis la melatonina (10^{-4} a 10^{-7} M) retrasó la senescencia foliar en más de tres días, al incrementar la actividad antioxidante y mitigar la degradación de las clorofilas (Liang et al., 2018; Wang et al., 2022b).

En *O. sativa*, *M. domestica* y *Origanum marjorana* L. en estreses hídrico, salino y metálico, la N-acetyl-5-metoxitriptamina (10^{-4} y 10^{-5} M) retrasó la senescencia de hojas en más de tres días, al estabilizar la capacidad fotosintética y el intercambio de gases, e incrementar la actividad de metabolitos primarios y secundarios (Farouk y Al-Amri, 2019b; Liang et al., 2015).

COMBINACIÓN DE MELATONINA CON OTRAS MOLECULAS

El uso de la N-acetyl-5-metoxitriptamina en la agricultura se puede potencializar al combinarse con otras moléculas; por ejemplo, la combinación de melatonina (10^{-5} M) con metil jasmonato (10^{-5} M) durante la postcosecha de *P. dactylifera* disminuyó la pérdida de peso y la pudrición de frutos, mantuvo su firmeza e incrementó el contenido de azúcares solubles y compuestos fenólicos (Fekry *et al.*, 2022). Por otro lado, la mezcla de la N-acetyl-5-metoxitriptamina (10^{-5} y 10^{-6} M) con AS (10^{-2} M) inhibió los efectos dañinos del estrés salino en *T. aestivum* y *Citrus aurantium* L., al mejorar la homeostasis, regular el metabolismo de nitrógeno y azúcares, la síntesis de poliamidas, estimular la actividad antioxidante, reducir la peroxidación lipídica y disminuir el estrés oxidativo (Kostopoulou *et al.*, 2015; Talaat y Shawky, 2022).

La melatonina interactúa con poliaminas, compuestos clave en la estabilización de las membranas celulares, la eliminación de especies reactivas de oxígeno y en la regulación de la germinación y la floración (Talaat, 2021); por ejemplo, en *M. hupehensis* Rehd, dicha interacción promueve la síntesis de más poliaminas, al activar enzimas como la ornitina descarboxilasa, estas poliaminas, a su vez, se integran con otras fitohormonas para potenciar sus efectos (Gong *et al.*, 2017).

ESPECIFICIDAD Y CONTRADICCIONES EN LA APLICACIÓN DE LA MELATONINA

En esta revisión se han encontrado reportes de respuestas contrastantes asociadas con la aplicación de N-acetyl-5-metoxitriptamina, que van desde la promoción hasta la inhibición del crecimiento. Esto se debe posiblemente a diversos factores como:

Efecto dosis-respuesta. La melatonina, al igual que otras moléculas, presenta efectos variables según su concentración; por ejemplo, dosis bajas (10^{-4} a 10^{-6} M) promueven procesos fisiológicos, mientras que dosis altas (10^{-3} M) inhiben la germinación y el crecimiento de las raíces (Sarropoulou *et al.*, 2012; Simlat *et al.*, 2018). Esto posiblemente se deba a una sobreestimulación de las vías de señalización o al estrés oxidativo inducido por las dosis altas de melatonina (Ikram *et al.*, 2024).

Susceptibilidad especie-específica. El efecto de la N-acetyl-5-metoxitriptamina varía significativamente entre especies; por ejemplo, su aplicación adelantó la floración en más del 50 % en sembradíos de *O. sativa*, mientras que en cultivos de *C. rubrum* retrasó la floración de los individuos en más de 40 % (Mou *et al.*, 2022).

A pesar de los efectos positivos reportados, esta revisión muestra que no existe una respuesta universal. Hay contradicciones que indican que, si bien la melatonina tiene potencial como bioestimulante, aún no existe una tecnología estandarizada para su uso agrícola de manera general. Se requiere investigación adicional para dilucidar los mecanismos especie-específicos, establecer protocolos de aplicación y evaluar la relación costo-beneficio en condiciones reales de producción.

LIMITACIONES, DESAFÍOS Y ALTERNATIVAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN COMERCIAL

A pesar del potencial que tiene la aplicación de la N-acetyl-5-metoxitriptamina como bioestimulante, su implementación en la agricultura enfrenta limitaciones técnicas, económicas y regulatorias que deben ser consideradas:

Precio comercial y acceso. En el mercado, la melatonina de grado analítico para uso en laboratorio (98 %, Farmacéutica Merck & Co., Inc., Alemania, 2026) supera los \$ 110,000.00 dólares estadounidenses (USD) por kilogramo, mientras que en 2026 la melatonina (polvo puro) en plataformas de comercio electrónico para minoristas (Mercado Libre, México, 2026) tuvo un precio comercial promedio de \$ 220.00 USD por kilogramo. Por lo tanto, la obtención de melatonina a través de empresas de comercio electrónico haría más accesible su uso, permitiendo su incorporación en productos comerciales.

Potencial de síntesis. Estudios recientes han demostrado que microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae* y *Escherichia coli* pueden producir N-acetyl-5-metoxitriptamina en concentraciones superiores a 1 g L^{-1} mediante fermentación (Luo *et al.*, 2020), lo que representa una alternativa para su producción a escala agrícola.

Estabilidad y formulación. La melatonina es fotosensible y puede degradarse al exponerse a radiación UV, es sensible a las altas temperaturas, principalmente al aplicarse en la etapa postcosecha (Pan *et al.*, 2023); por ello, es necesario desarrollar formulaciones que incluyan protectores UV, encapsulamiento o agentes antioxidantes para su aplicación en cultivos, como tratamientos postcosecha con el propósito de conservar frutas y hortalizas.

Homologación regulatoria. En varios países, N-acetyl-5-metoxitriptamina no está regulada como producto agrícola por su dificultad de registro. Su comercialización se dificulta porque no está clasificada como fertilizante, producto fitosanitario o enmienda orgánica (McLellan *et al.*, 2024); por lo tanto, es necesario establecer un marco normativo que permita su uso seguro y eficaz en

la agricultura, con el objetivo de aprovechar su potencial como bioestimulante vegetal.

Competitividad comercial. Para evaluar la viabilidad económica de la melatonina como bioestimulante, es necesario comparar su precio con el de otros productos disponibles en el mercado (Cuadro 1).

Actualmente, la melatonina tiene un costo superior al de los extractos de algas y aminoácidos hidrolizados; sin embargo, sus mecanismos de acción difieren de los de estos productos. Desde el punto de vista económico, su uso masivo se ve limitado por esta diferencia de precio, en especial en cultivos de bajo valor comercial (Hinge *et al.*, 2025; Sganzerla *et al.*, 2025).

CONCLUSIONES

En la germinación, así como en el desarrollo de la raíz, el vástago y los frutos se han observado efectos contrastantes derivados de la aplicación de N-acetyl-5-metoxitriptamina. Para que estos efectos sean benéficos es necesario considerar la especie, la dosis y la etapa fenológica de aplicación. Entre los principales beneficios, destacan la mitigación de estreses abióticos y la mejora del desarrollo y rendimiento de las plantas. El uso de melatonina puede contribuir a una agricultura sostenible, al reducir la dependencia de productos químicos agrícolas nocivos para el ambiente; sin embargo, es necesario profundizar en el estudio de los mecanismos mediante los cuales la melatonina regula los niveles endógenos de otras fitohormonas como el ácido indolacético, ácido abscísico, etileno, ácido salicílico y ácido jasmónico; no obstante, debe enfatizarse que la N-acetyl-5-metoxitriptamina es solo un bioestimulante potencial, no una tecnología agrícola consolidada. Los resultados encontrados son frecuentemente contrastantes debido a la particularidad especie-específica y al efecto dosis-respuesta, lo que limita su implementación inmediata. Por lo tanto, cualquier extrapolación a la agricultura comercial debe realizarse bajo estudios específicos por cultivo y condición ambiental.

En el contexto de la agricultura sostenible, la integración de la melatonina en los planes de manejo agrícola puede mejorar el desarrollo de los cultivos, particularmente el enraizamiento, la floración, la fructificación, así como aumentar su resiliencia frente a factores estresantes; además, la aplicación combinada de N-acetyl-5-metoxitriptamina con otras moléculas, representa un área de oportunidad que requiere más investigación, con el fin de fomentar un enfoque holístico que integre el cultivo, el suelo, los microorganismos y el entorno, para obtener mejores rendimientos. Finalmente, se debe prestar particular atención a la relación costo-beneficio, la cual debe apoyar una agricultura rentable. Es necesario diseñar tecnologías adaptadas para cada cultivo y situación, considerando su impacto en los costos y la rentabilidad, lo que exige investigación dirigida que corrobore los beneficios específicos y determine el momento oportuno de aplicación, particularmente en condiciones de estrés abiótico, cuyo origen ambiental dificulta su predicción.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de las Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento “Cambio Climático, Estrés en Plantas y Mitigación”, “Gestión, Innovación y Valor Agregado de Recursos Vegetales del Posgrado en Botánica en el Colegio de Postgraduados. J. L. Díaz Nuñez agradece al Programa de Investigadoras e Investigadores cátedra-COMECYT-2024 (Folio: RCAT2024-0003).

BIBLIOGRAFÍA

Abbas F., Y. Zhou, J. He, Y. Ke, W. Qin, R. Yu and Y. Fan (2021) Metabolite and transcriptome profiling analysis revealed that melatonin positively regulates floral scent production in *Hedychium coronarium*. *Frontiers in Plant Science* 12:808899, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.808899>

Ahmad S., W. N. Su, M. Kamran, I. Ahmad, X. P. Meng, X. R. Wu, ... and Q. Han (2020) Foliar application of melatonin delay leaf senescence in maize by improving the antioxidant defense system and enhancing photosynthetic capacity under semi-arid regions. *Protoplasma* 257:1079-1092, <https://doi.org/10.1007/s00709-020-01491-3>

Cuadro 1. Comparación de precios referenciales de bioestimulante.

Producto	Precio (USD kg ⁻¹)	Referencias
Melatonina (grano analítico)	\$ 110,000.00	Farmacéutica Merck & Co., Inc., 2026
Melatonina (grado industrial)	\$ 220.00	Mercado Libre México, 2026
Extractos de algas	\$ 40.00 a \$ 60.00	Sganzerla <i>et al.</i> (2025)
Aminoácidos hidrolizados	\$ 40.00 a \$ 50.00	Hinge <i>et al.</i> (2025)

- Aijaz I., E. H. Kwon, I. J. Lee and A. L. Khan (2025) Melatonin microbe interactions in plant rhizosphere. *iScience* 28:113704, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.113704>
- Arnao M. B., A. Cano and J. Hernández-Ruiz (2022) Phytomelatonin: an unexpected molecule with amazing performances in plants. *Journal of Experimental Botany* 73:5779-5800, <https://doi.org/10.1093/jxb/erac009>
- Cao S., J. Shao, L. Shi, L. Xu, Z. Shen, W. Chen and Z. Yang (2018) Melatonin increases chilling tolerance in postharvest peach fruit by alleviating oxidative damage. *Scientific Reports* 8:806, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19363-5>
- Cao Y. Y., C. D. Qi, S. Li, Z. Wang, X. Wang, J. Wang, ... and Y. D. Gou (2019) Melatonin alleviates copper toxicity via improving copper sequestration and ROS scavenging in Cucumber. *Plant and Cell Physiology* 60:562-574, <https://doi.org/10.1093/pcp/pcy226>
- Castañares J. L. and C. A. Bouzo (2019) Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.) under salt stress. *Horticultural Plant Journal* 5:79-87, <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.01.002>
- Chen Z., Q. Gu, X. Yu, L. Huang, S. Xu, R. Wang, ... and W. Shen (2018) Hydrogen peroxide acts downstream of melatonin to induce lateral root formation. *Annals of Botany* 121:1127-1136, <https://doi.org/10.1093/aob/mcx207>
- Chen L., B. Lu, L. T. Liu, W. J. Duan, D. Jiang, J. Li, ... and Z. Bai (2021) Melatonin promotes seed germination under salt stress by regulating ABA and GA₃ in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry* 162:506-516, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.029>
- Dong J. X., M. Kebbeh, R. Yan, C. Huan, T. J. Jiang and X. L. Zheng (2021) Melatonin treatment delays ripening in mangoes associated with maintaining the membrane integrity of fruit exocarp during postharvest. *Plant Physiology and Biochemistry* 169:22-28, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.10.038>
- Fan S., T. T. Xiong, Q. M. Lei, Q. Q. Tan, J. H. Cai, Z. Y. Song, ... and X. Zhu (2022a) Melatonin treatment improves postharvest preservation and resistance of guava fruit (*Psidium guajava* L.). *Foods* 11:262, <https://doi.org/10.3390/foods11030262>
- Fan Y., C. Li, Y. Li, R. Huang, M. Guo, J. Liu, ... and Y. Ge (2022b) Postharvest melatonin dipping maintains quality of apples by mediating sucrose metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry* 174:43-50, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.034>
- Farouk S. and S. M. Al-Amri (2019a) Ameliorative roles of melatonin and/or zeolite on chromium-induced leaf senescence in marjoram plants by activating antioxidant defense, osmolyte accumulation, and ultrastructural modification. *Industrial Crops and Products* 142:111823, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111823>
- Farouk S. and S. M. Al-Amri (2019b) Exogenous melatonin-mediated modulation of arsenic tolerance with improved accretion of secondary metabolite production, activating antioxidant capacity and improved chloroplast ultrastructure in rosemary herb. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 180:333-347, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.021>
- Fekry W. M. E., Y. M. Rashad, I. A. Alaraidh and T. Mehany (2022) Exogenous application of melatonin and methyl jasmonate as a pre-harvest treatment enhances growth of Barhi date palm trees, prolongs storability, and maintains quality of their fruits under storage conditions. *Plants* 11:96, <https://doi.org/10.3390/plants11010096>
- Gong X., S. Shi, F. Dou, Y. Song and F. Ma (2017) Exogenous melatonin alleviates alkaline stress in *Malus hupehensis* Rehd. by regulating the biosynthesis of polyamines. *Molecules* 22:1542, <https://doi.org/10.3390/molecules22091542>
- Hinge M., V. A. Grilo, F. U. Jehn, J. B. Garcia M., F. J. Dingal, M. Y. Roleda and D. Denkenberger (2025) Seaweed cultivation: a cost-effective strategy for food production in a global catastrophe. *Aquaculture International* 33:344, <https://doi.org/10.1007/s10499-025-01978-x>
- Hu W., Y. Cao, D. A. Loka, K. R. Harris-Shultz, R. J. Reiter, S. Ali, ... and Z. Zhou (2020) Exogenous melatonin improves cotton (*Gossypium hirsutum* L.) pollen fertility under drought by regulating carbohydrate metabolism in male tissues. *Plant Physiology and Biochemistry* 151:579-588, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.001>
- Ikram M., M. Mehran, H. ur Rehman, S. Ullah, M. Z. M. Bakhsh, M. Tahira, ... and A. El Sabagh (2024) Mechanistic review of melatonin metabolism and signaling pathways in plants: biosynthesis, regulation, and roles under abiotic stress. *Plant Stress* 14:100685, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100685>
- Kolář J., C. H. Johnson and I. Macháčková (2003) Exogenously applied melatonin (N-acetyl-5-methoxytryptamine) affects flowering of the short-day plant *Chenopodium rubrum*. *Physiologia Plantarum* 118:605-612, <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00114.x>
- Kostopoulou Z., I. Therios, E. Roumeliotis, A. K. Kanellis and A. Molassiotis (2015) Melatonin combined with ascorbic acid provides salt adaptation in *Citrus aurantium* L. seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 86:155-165, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.11.021>
- Li J., C. Zhao, M. Zhang, F. Yuan and M. Chen (2019) Exogenous melatonin improves seed germination in *Limonium bicolor* under salt stress. *Plant Signaling & Behavior* 14:1659705, <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1659705>
- Liang C., G. Zheng, W. Li, Y. Wang, B. Hu, H. Wang, ... and C. Chu (2015) Melatonin delays leaf senescence and enhances salt stress tolerance in rice. *Journal of Pineal Research* 59:91-101, <https://doi.org/10.1111/jpi.12243>
- Liang C., A. Li, H. Yu, W. Li, C. Liang, S. Guo, ... and C. Chu (2017) Melatonin regulates root architecture by modulating auxin response in rice. *Frontiers in Plant Science* 8:134, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00134>
- Liang D., Y. Shen, Z. Ni, Q. Wang, Z. Lei, N. Xu, ... and H. Xia (2018) Exogenous melatonin application delays senescence of kiwifruit leaves by regulating the antioxidant capacity and biosynthesis of flavonoids. *Frontiers in Plant Science* 9:426, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00426>
- Liang D., Z. Ni, H. Xia, Y. Xie, X. Lv, J. Wang, ... and X. Luo (2019) Exogenous melatonin promotes biomass accumulation and photosynthesis of kiwifruit seedlings under drought stress. *Scientia Horticulturae* 246:34-43, <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2018.10.058>
- Liu J., R. Zhai, F. Liu, Y. Zhao, H. Wang, L. Liu, ... and L. Xu (2018) Melatonin induces parthenocarpy by regulating genes in gibberellin pathways of 'Starkrimson' pear (*Pyrus communis* L.). *Frontiers in Plant Science* 9:946, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00946>
- Liu J., R. Yue, M. Si, M. Wu, L. Cong, R. Zhai, ... and L. Xu (2019) Effects of exogenous application of melatonin on quality and sugar metabolism in 'Zaosu' pear fruit. *Journal of Plant Growth Regulation* 38:1161-1169, <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09921-0>
- Liu Z., H. Dai, J. Hao, R. Li, X. Pu, M. Guan and Q. Chen (2023) Current research and future directions of melatonin's role in seed germination. *Stress Biology* 3:53, <https://doi.org/10.1007/s44154-023-00139-5>
- Luo H., K. Schneider, U. Christensen, Y. Lei, M. Herrgard and B. Ø. Palsson (2020) Microbial synthesis of human-hormone melatonin at gram scales. *ACS Synthetic Biology* 9:1240-1245, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssynbio.0c00065>
- Magra A. and M. Petriccione (2022) Melatonin treatment reduces qualitative decay and improves antioxidant system in highbush blueberry fruit during cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 102:4229-4237, <https://doi.org/10.1002/jsfa.11774>
- Mannino G., C. Pernici, G. Serio, C. Gentile and C. M. Berteà (2021) Melatonin and phytomelatonin: chemistry, biosynthesis, metabolism, distribution and bioactivity in plants and animals—an overview. *International Journal of Molecular Sciences* 22:9996, <https://doi.org/10.3390/ijms22189996>
- Mao J., C. Niu, K. Li, S. Chen, M. M. Tahir, M. Han and D. Zhang (2020) Melatonin promotes adventitious root formation in apple by promoting the function of MdWOX11. *BMC Plant Biology* 20:536, <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02747-z>
- McLellan E. M., I. J. Haq, A. M. Ebdon, N. Vasey and K. N. Anderson (2024) Patient-level analysis of the cost and variation in melatonin prescribing patterns in those under 18 in the North East of England. *BMJ Paediatrics Open* 8:e002652, <https://doi.org/10.1136/bmjpo-2024-002652>

- Menaka M., R. Asrey, B. R. Vinod, N. K. Meena, S. Sethi and S. Ahmed (2024) Pre-storage melatonin treatment maintains cell membrane integrity, reduces fruit browning and decay incidence in guava (*Psidium guajava*). *Indian Journal of Agricultural Sciences* 94:387-392, <https://doi.org/10.56093/ijas.v94i4.141747>
- Mou Z., H. Wang, S. Chen, R. J. Reiter and D. Zhao (2022) Molecular mechanisms and evolutionary history of phyto-melatonin in flowering. *Journal of Experimental Botany* 73:5840-5850, <https://doi.org/10.1093/jxb/erac164>
- Pan Y., X. Xu, L. Li, Q. Sun, Q. Wang, H. Huang, ... and J. Zhang (2023) Melatonin-mediated development and abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science* 14:1100827, <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1100827>
- Qi Z. Y., K. X. Wang, M. Y. Yan, M. Kanwar, D. Y. Li, L. Wijaya, ... and J. Zhou (2018) Melatonin alleviates high temperature-induced pollen abortion in *Solanum lycopersicum*. *Molecules* 23:386, <https://doi.org/10.3390/molecules23020386>
- Sarropoulou V., K. Dimassi-Therios, I. Therios and M. Koukourikou-Petridou (2012) Melatonin enhances root regeneration, photosynthetic pigments, biomass, total carbohydrates and proline content in the cherry rootstock PHL-C (*Prunus avium* × *Prunus cerasus*). *Plant Physiology and Biochemistry* 61:162-168, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.10.001>
- Sarrou E., I. Therios and K. Dimassi-Therios (2014) Melatonin and other factors that promote rooting and sprouting of shoot cuttings in *Punica granatum* cv. Wonderful. *Turkish Journal of Botany* 38:293-301, <https://doi.org/10.3906/bot-1302-55>
- Sganzerla W. G., B. P. Moreira, D. Lachos-Perez, G. L. Zabot, L. E. N. Castro, T. Forster-Carneiro and M. A. Rostagno (2025) Techno-economic analysis of amino acids production with subcritical water technology. *The Journal of Supercritical Fluids* 222:106595, <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2025.106595>
- Simlat M., A. Ptak, E. Skrzypek, M. Warchol, E. Moraiska and E. Piórkowska (2018) Melatonin significantly influences seed germination and seedling growth of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Peer J* 6:e5009, <https://doi.org/10.7717/peerj.5009>
- Talaat N. B. (2021) Polyamine and nitrogen metabolism regulation by melatonin and salicylic acid combined treatment as a repressor for salt toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants. *Plant Growth Regulation* 95:315-329, <https://doi.org/10.1007/s10725-021-00740-6>
- Talaat N. B. and B. T. Shawky (2022) Synergistic effects of salicylic acid and melatonin on modulating ion homeostasis in salt-stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) plants by enhancing root H⁺-pump activity. *Plants* 11:416, <https://doi.org/10.3390/plants11030416>
- Teng Z., W. Zheng, S. Jiang, S. B. Hong, Z. Zhu and Y. Zang (2022) Role of melatonin in promoting plant growth by regulating carbon assimilation and ATP accumulation. *Plant Science* 319:111276, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111276>
- Tijero V., P. Munoz and S. Munné-Bosch (2019) Melatonin as an inhibitor of sweet cherries ripening in orchard trees. *Plant Physiology and Biochemistry* 140:88-95, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.007>
- Wang L., Z. Luo, M. Yang, D. Li, M. Qi, Y. Xu, ... and L. Li (2020) Role of exogenous melatonin in table grapes: first evidence on contribution to the phenolics-oriented response. *Food Chemistry* 329:127155, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127155>
- Wang D., Q. Chen, W. Chen, Q. Guo, Y. Xia, D. Wu, ... and G. Liang (2021) Melatonin treatment maintains quality and delays lignification in loquat fruit during cold storage. *Scientia Horticulturae* 284:110126, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110126>
- Wang K., Q. Xing, G. J. Ahammed and J. Zhou (2022a) Functions and prospects of melatonin in plant growth, yield, and quality. *Journal of Experimental Botany* 73:5928-5946, <https://doi.org/10.1093/jxb/erac233>
- Wang K., S. Cai, Q. Xing, Z. Qi, V. Fotopoulos, J. Yu and J. Zhou (2022b) Melatonin delays dark-induced leaf senescence by inducing *miR171b* expression in tomato. *Journal of Pineal Research* 72:e12792, <https://doi.org/10.1111/jpi.12792>
- Wen D., B. Gong, S. Sun, S. Liu, X., Wang, M. Wei ... and Q. Shi (2016) Promoting roles of melatonin in adventitious root development of *Solanum lycopersicum* L. by regulating auxin and nitric oxide signaling. *Frontiers in Plant Science* 7:718, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00718>
- Xia H., Y. Shen, H. Deng, J. Wang, L. Lin, Q. Deng, ... and B. Xiong (2021) Melatonin application improves berry coloration, sucrose synthesis, and nutrient absorption in 'Summer Black' grape. *Food Chemistry* 356:129713, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129713>
- Xiang D., C. D. Nguyen, L. Felter, D. Clark and H. Huo (2020) The effects of reharvest LED light, melatonin and AVG treatments on the quality of postharvest snapdragon and vase life. *Journal of Floriculture and Landscaping* 6:14-19, <https://doi.org/10.25081/jfcls.2020.v6.6236>
- Xiao S., L. Liu, H. Wang, D. Li, Z. Bai, Y. Zhang, ... and C. Li (2019) Exogenous melatonin accelerates seed germination in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *PLoS ONE* 14:e0216575, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216575>
- Xie Q., Y. Zhang, Y. Cheng, Y. Tian, J. Luo, Z. Hu and G. Chen (2022) The role of melatonin in tomato stress response, growth and development. *Plant Cell Reports* 41:1631-1650, <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02876-9>
- Ye J., W. Yang, Y. Li, S. Wang, L. Yin and X. Deng (2020) Seed pre-soaking with melatonin improves wheat yield by delaying leaf senescence and promoting root development. *Agronomy* 10:84, <https://doi.org/10.3390/agronomy10010084>
- Zahedi S. M., M. S. Hosseini, J. Abadía and M. Marjani (2020) Melatonin foliar sprays elicit salinity stress tolerance and enhance fruit yield and quality in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Plant Physiology and Biochemistry* 149:313-323, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.021>
- Zhang N., B. Zhao, H. J. Zhang, S. Weeda, C. Yang, Z. C. Yang, ... and Y. D. Guo (2013) Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Pineal Research* 54:15-23, <https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2012.01015.x>
- Zhang H., L. Wang, K. Shi, D. Shan, Y. Zhu, C. Wang, ... and Z. Kong (2019) Apple tree flowering is mediated by low level of melatonin under the regulation of seasonal light signal. *Journal of Pineal Research* 66:e12551, <https://doi.org/10.1111/jpi.12551>