

¿Podemos producir lo mismo con menos?

Jesús Antonio **Angole Tierrablanca**
Ramón Gerardo **Guevara González**

El famoso proverbio “lo que no te mata, te fortalece” podría considerarse una analogía de un fenómeno conocido como hormesis, que describe la interacción entre un ser vivo y un agente, el cual usualmente podría considerarse como dañino e incluso tóxico.

Según la toxicología, cualquier sustancia puede ser dañina dependiendo de la dosis. La hormesis juega con este concepto para encontrar un punto medio útil en beneficio de las plantas y, en consecuencia, para el ser humano (Calabrese, 2004). Según la dosis aplicada del “veneno” será la respuesta que obtendremos, desde la inocua, hasta la letal. Lo interesante es descubrir si existe alguna dosis con la cual tengamos un efecto benéfico para el organismo (Agathokleous y Calabrese, 2019).

PROBLEMAS ACTUALES EN LA AGRICULTURA

La agricultura utiliza principalmente agua y suelo para la producción de alimentos. Anualmente, el sector agrícola consume grandes cantidades de estos recursos debido a malas prácticas agrícolas e ideas antiguas; por ejemplo, la premisa de que “más es mejor”, refiriéndose al uso de agroquímicos y fertilizantes empleados de forma desmedida. Esta creencia puede ser contraproducente para el equilibrio ecológico en el ecosistema y, de hecho, ha sido dañina para los cultivos, ya que promueve la aparición de plagas y patógenos más resistentes que crecen sin la competencia

de otros depredadores. Actualmente se buscan estrategias que ayuden a mitigar los efectos derivados de décadas de malas prácticas. Entre ellas están la remediación del suelo, la introducción de microorganismos benéficos, el mejoramiento de los sistemas de riego, etcétera. Sin embargo, la humanidad requiere de alimentos en grandes cantidades, y dicha demanda se incrementará aún más con el paso del tiempo. La producción de alimentos de manera sustentable es un reto extremadamente complejo. Una estrategia para resolver esta problemática es el mejoramiento de los cultivos; es decir, contar con variedades de cultivos que puedan adaptarse a condiciones adversas. Esto se puede lograr modificando su metabolismo y fisiología para garantizar su crecimiento. A través de esta estrategia, las variedades se adaptan aun cuando se encuentren en condiciones que les produzca estrés, como el cambio climático (Gupta *et al.*, 2020)

AGENTES ESTRESORES

Cuando pensamos en la producción de alimentos (frutas, hortalizas, semillas, etc.), nos imaginamos muchas hectáreas de terreno, o bien, invernaderos sumamente controlados para producir grandes cantidades y reducir las pérdidas. Pese a los sistemas de control, las plantas están en un constante cambio de las condiciones del medio; estos cambios generan cierta cantidad de estrés, al cual la planta debe aprender a adaptarse modulando sus mecanismos fisiológicos para asegurar su supervivencia. Tales cambios constantes en el entorno se explican con el fenómeno de la alostasis, que se adapta y complementa con el concepto de homeostasis, que tradicionalmente ha considerado que los organismos mantienen un estado basal de equilibrio interno en el que no experimentan estrés, y que cualquier perturbación externa rompería dicho equilibrio. Sin embargo, en la naturaleza, la homeostasis es un proceso dinámico y continuo que implica una regulación constante de las condiciones internas, permitiendo que los organismos se adapten a los cambios ambientales de manera eficiente, sin un estado fijo de reposo absoluto (Lemos, 2015).

Para entender el concepto de la hormesis, debemos decir que existen muchos tipos de agentes estresores para los cultivos, por ejemplo, ciertos tipos de radiación ultravioleta, el sonido, los cambios de temperatura, la salinidad del suelo, la presencia de patógenos o plagas, la falta o exceso de agua y nutrientes, etcétera; muchos de estos fenómenos ocurren todos los días y no tenemos un control estricto sobre ellos, al menos no de forma inmediata (Caicedo-López *et al.*, 2021). Cuando estos estresores entran en contacto con los organismos tienden a promover la producción de radicales libres, formados por las especies reactivas de oxígeno (EROs) como O_2^- , H_2O_2 y OH. Estos compuestos están asociados a procesos muy importantes como la diferenciación celular (a qué función se va a dedicar esa célula), la apoptosis (muerte celular programada) y la necrosis (muerte celular). Sin embargo, los radicales libres en grandes cantidades son muy peligrosos debido a su alta reactividad y a su facilidad para desestabilizar ciertas estructuras celulares, lo cual podría llevar a la muerte de la planta (Figura 1) (Jomova *et al.*, 2023).

ELICITACIÓN

Recordando el concepto de alostasis podemos considerar que la planta buscará algún mecanismo para defenderse ante condiciones adversas; esto lo hará mediante la activación de su sistema inmunitario de forma similar a como lo hace el ser humano. Lo primero que hará la planta es defenderse mediante enzimas antioxidantes (superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa y catalasa) que intentarán convertir los radicales libres generados por el estrés en moléculas estables como el agua, que no representan un peligro para la planta. Pero esta defensa no es cien por ciento efectiva.

Existe otro mecanismo de defensa: la producción de metabolitos secundarios con capacidad antioxidante (fenoles y flavonoides). Los metabolitos también ayudan en la captura y estabilización de moléculas peligrosas. A la activación del sistema inmunitario por efecto de algún agente estresor (elicitador) se le conoce como elicitation (Figura 1) (Gómez-Mendoza *et al.*, 2023; Jomova *et al.*, 2023).

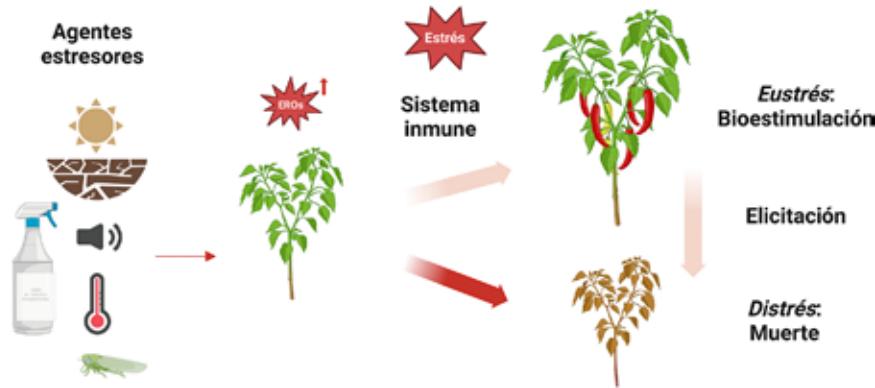


Figura 1. Posibles respuestas de la planta frente a un agente estresor que incrementa el estrés oxidativo mediante la producción de especies reactivas de oxígeno (EROs), y la activación del sistema inmunitario. Estas respuestas pueden derivar en eustrés o distrés, dependiendo de la magnitud del estrés inducido. Basado en Godínez-Mendoza et al. (2023) y creado en BioRender.

Muchos de los metabolitos secundarios son de interés a nivel nutricional, como el licopeno en el jitomate y la capsaicina en el chile. Sin embargo, hay que recordar que la función principal del sistema inmunitario es asegurar la supervivencia de la planta ante condiciones desfavorables, como el estrés hídrico, aun cuando la planta deba sacrificar su crecimiento. Una de las respuestas de supervivencia es la síntesis de algunos azúcares altamente solubles en agua (osmolitos); los osmolitos, bajo condiciones de estrés hídrico, retienen la poca cantidad de agua que ingresa a través de la raíz y que se distribuye por toda la planta (Moreno, 2009).

BIOESTIMULACIÓN

Otro fenómeno relacionado con la hormesis es el de bioestimulación, que implica una respuesta benéfica para la planta ante algún agente promotor del crecimiento. Usualmente, los agentes bioestimulantes logran que las plantas se desarrolle mejor manera, incrementen su área foliar e incluso generen frutos más grandes (Figura 1). Muchos de estos promotores del crecimiento pueden ser de origen no biológico, por ejemplo, la luz y el sonido; algunos otros promotores pueden ser organismos vivos como bacterias y hongos benéficos. Además, existen algunos promotores que son producto del metabolismo de las plantas, como el ácido salicílico e incluso el peróxido de hidrógeno (H_2O_2); estos son considerados dentro del grupo de las hormonas vegetales. Los promotores del crecimiento (elicitores) han sido calificados como estimulantes del sistema inmunitario de la planta,

así como la activación de genes asociados a ciertos tipos de estrés. Un ejemplo de esto es el H_2O_2 , cuya implicación en la expresión de genes asociados al estrés hídrico (falta o exceso de agua) está demostrada. (Caicedo-López et al., 2021).

HORMESIS: LA DOSIS PERFECTA

Con base en la presentación de los conceptos de elicición y bioestimulación se abordará ahora la hormesis, qué es y cómo manejarla para nuestro beneficio.

Coloquialmente, se dice que nada es bueno o malo *per se*, todo depende de la dosis. Como hemos aprendido, las plantas, y en general todos los organismos vivos, buscarán la supervivencia, aun si deben modificar algo en su estructura o en su metabolismo (Calabrese, 2004). Pero, ¿cómo algo tóxico o dañino puede hacer bien a los cultivos? Como se mencionó, existen diferentes tipos de estresores, los cuales pueden ser físicos (luz, sonido, alta o baja temperatura, sequía), biológicos (insectos, microorganismos, fragmentos de moléculas o productos de su metabolismo), químicos (sustancias químicas de origen no biológico y elementos tóxicos). Se ha demostrado que la aplicación de algunos agentes, como nanopartículas de dióxido de titanio en concentraciones de 25 a 100 partes por millón, inducen en plantas como el maíz y el tomate la activación de su sistema inmunitario o la modificación de ciertas estructuras para defenderse del estrés (Trela-Makowej et al., 2023). En ocasiones, esta respuesta permite que el organismo se adapte a

Típica Respuesta Hormética Dosis-Respuesta

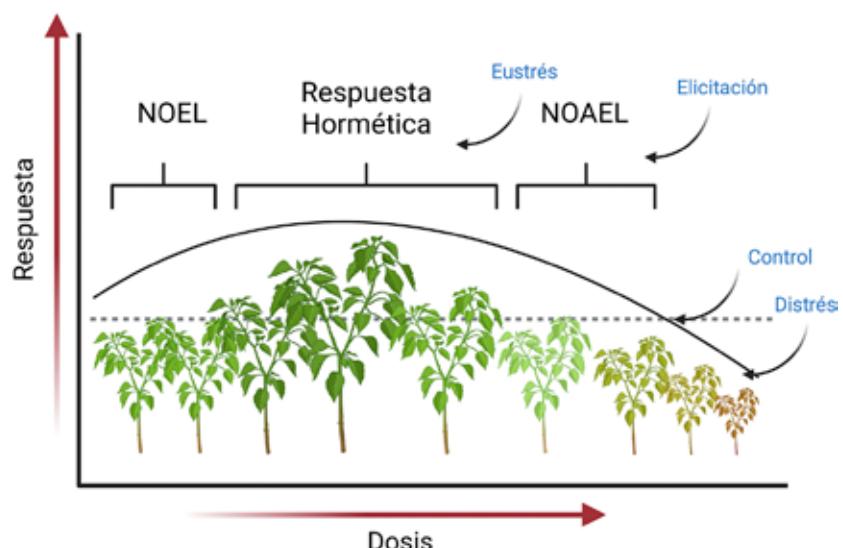


Figura 2. Típica respuesta hormética de la planta al incremento de la dosis de un agente estresor; obsérvense las cuatro principales fases de la hormesis. Basado en Agathokleous *et al.* (2018) y creado en BioRender.

las nuevas condiciones, lo que incluye un aumento del área foliar, raíces más fuertes e incluso una mayor producción de antioxidantes. Este fenómeno, conocido como *eustrés* o estrés beneficioso, está estrechamente vinculado al concepto de hormesis. Ahora bien, la hormesis consta de cuatro fases principales. La primera de ellas es NOEL, por sus siglas en inglés, que significa sin efecto observado; en esta etapa, las plantas no sufren daño o cambio significativos después de la aplicación del agente estresor. Cuando incrementamos la dosis podemos encontrar la zona de bioestimulación en la cual las plantas se desarrollan de mejor manera, forman estructuras más resistentes, producen más frutos, etcétera. Sin embargo, si se continúa incrementando la dosis del estresor llegará a un punto en que la respuesta hormética se detenga y comience la toxicidad; aquí, la planta entra en la fase conocida como NOAEL (efectos adversos no observados). Muchas veces esta fase está vinculada a la síntesis de metabolitos secundarios como respuesta al estrés (elicitación) (Agathokleous *et al.*, 2018). Sin embargo, se debe tener en cuenta que no todas las plantas funcionan de la misma manera; esto significa que lo que para alguna planta es beneficioso, para otra podría ser mortal. Esta última condición se conoce como *distrés*, debido a que la planta sufre

tanto estrés y la respuesta de defensa de la planta se incrementa a tal nivel que simplemente decrece el crecimiento e incluso muere (Figura 2) (Agathokleous y Calabrese, 2019; Godínez-Mendoza *et al.*, 2023).

Recientemente se ha investigado el uso de ciertos agentes que suelen generar “toxicidad” para utilizarlos como promotores del crecimiento; algunos de estos agentes incluyen el uso de nanopartículas con metales pesados, la irradiación con luz ultravioleta, la aplicación de compuestos altamente reactivos como el peróxido de hidrógeno, e incluso agentes patógenos, o parte de ellos, como alternativa a ciertos agroquímicos (Trela-Makowej *et al.*, 2023). Este comportamiento se ha observado en plantas de jitomate, chile, lechuga, pepino, brócoli, maíz, arroz, tabaco e inclusive en plantas ornamentales. Lo anterior sugiere que quizás se pueda manipular el comportamiento hormético de las plantas para obtener rendimientos similares a los actuales, pero con el uso de menos recursos debido a que estas plantas, previamente estresadas, buscarán la optimización de los recursos para su desarrollo y supervivencia, y generarán una adaptación al medio (Godínez-Mendoza *et al.*, 2023).

CONCLUSIÓN

El estudio y manejo de la hormesis en la producción agrícola es una alternativa ante la situación climática



© Enrique Soto. *Sin título*, Pátzcuaro, Michoacán, ca. 1981.



© Enrique Soto. *Sin título*, Pátzcuaro, Michoacán, ca. 1981.

actual. El conocimiento de los fundamentos básicos de respuesta ante un agente estresor (biótico o abiótico) permitiría generar plantas con capacidad de adaptación a condiciones adversas. Si se aplica de manera intencional un agente estresor en bajas concentraciones, se puede inducir el desarrollo de mecanismos de defensa (posiblemente heredables); estos mecanismos le permitirán a la planta adaptarse a condiciones como la sequía, los suelos salinos o las altas y bajas temperaturas. Con la aplicación intencional de algún agente estresante es posible simular un ambiente hostil; es decir, inducir a la planta para que busque optimizar recursos (agua y nutrientes).

Así, es posible que los cultivos tengan un desarrollo normal a pesar de una disminución en los recursos disponibles; o, por el contrario, que incremente el desarrollo y producción de plantas que utilicen eficazmente los recursos que le son suministrados. Entonces, se puede decir que mediante el manejo de la hormesis en los cultivos, bajo ciertas condiciones, menos puede ser más, y que se abre ante nosotros una perspectiva diferente de la agricultura sostenible.

AGRADECIMIENTOS

A CONAHCYT, por el apoyo para estudiar la Maestría en Biosistemas. A la Universidad Autónoma de Querétaro, por el respaldo durante esta trayectoria.

R E F E R E N C I A S

Agathokleous E and Calabrese EJ (2019). Hormesis: The dose response for the 21st century: The future has arrived. *Toxicology* 425:152249.

Agathokleous E, Kitao M and Calabrese EJ (2018). Environmental hormesis and its fundamental biological basis: Rewriting the history of toxicology. *Environmental Research* 165:274-278.

Caicedo-López LH, Aranda ALV, Gómez CEZ, Márquez EE y Zepe-dá HR (2021). Elicitores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana. *Revista Bioética* 29:76-86.

Calabrese EJ (2004). Hormesis: from marginalization to mainstream: a case for hormesis as the default dose-response model in risk assessment. *Toxicology and applied pharmacology* 197(2):125-136.

Godínez-Mendoza PL, Rico-Chávez AK, Ferrusquía-Jimenez NI, Carabajal-Valenzuela IA, Villagómez-Aranda AL, Torres-Pacheco I and Guevara-González RG (2023). Plant hormesis: Revising of the concepts of biostimulation, elicitation and their application in a sustainable agricultural production. *Science of The Total Environment* 164883.

Gupta A, Rico-Medina A and Caño-Delgado AI (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science* 368(6488):266-269.

Jomova K, Raptova R, Alomar SY, Alwasel SH, Nepovimova E, Kuca K and Valko M (2023). Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: Chronic diseases and aging. *Archives of toxicology* 97(10):2499-2574.

Lemos M (2015). La teoría de la alóstasis como mecanismo explicativo entre los apegos inseguros y la vulnerabilidad a enfermedades crónicas. *Anales de Psicología/Annals of Psychology* 31(2):452-461.

Moreno LP (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía colombiana* 27(2):179-191.

Trela-Makowej A, Orzechowska A, Szymańska R (2023). Less is more: The hormetic effect of titanium dioxide nanoparticles on plants. *Science of The Total Environment* 168669.

Jesús Antonio Angole Tierrablanca
Ramón Gerardo Guevara González
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Campus Amazcala
jesus.a.angole.t@gmail.com



© Enrique Soto. *Sin título*, Pátzcuaro, Michoacán, ca. 1981.



© Enrique Soto. *Sin título*, Puerto de Veracruz, ca. 1978.