

El estrés vegetal: principios, aplicaciones y perspectivas

Las plantas son la base de la alimentación humana y fuente imprescindible de medicamentos y materias primas. Por esa razón, los científicos buscan desarrollar tecnologías para optimizar su aprovechamiento. La exposición de las plantas a cierto grado de estrés es una técnica agrícola que permite estimular respuestas positivas con un sinnúmero de aplicaciones relevantes, técnica de la cual queda mucho por descubrir.

Introducción

Es probable que por experiencia tengamos una buena idea de lo que es el estrés y lo que provoca en nuestro organismo. Cuando tenemos muchas preocupaciones, entramos en un estado de tensión que nos impide dormir y, en general, vivir normalmente. Pero, ¿qué pensarías si te dijeran que el estrés puede ser bueno? Para aclarar esta idea, comencemos definiendo qué es el estrés.

El estrés es una condición natural que prepara a cualquier ser vivo para enfrentar los retos de su entorno. Consiste en un estado de tensión que se desata al reconocer una situación difícil y que provoca respuestas en el organismo que lo fortalecen temporalmente. Esto ocurre, por ejemplo, cuando nos ejercitamos o nos esforzamos estudiando para un examen. Cuando la situación estresante termina (la prueba física o el examen), nos sentimos realizados y más fuertes que antes. Pero cuando la tensión es prolongada, repercute en la salud, provocando incluso una enfermedad grave. Algo similar ocurre en otros seres vivos, como las plantas.

Existen factores físicos, químicos o biológicos que pueden provocar estrés en las plantas, y puesto que son incapaces de moverse y huir, ellas han desarrollado un complejo sistema de defensa o adaptación. Además de poseer barreras físicas, como espinas y cortezas duras, las plantas también se protegen de las amenazas mediante una “guerra química”. Ante una situación peligrosa, una planta sintetiza compuestos químicos que le permiten ahuyentar herbívoros, controlar infecciones, e incluso comunicarse con otras plantas. Estos compuestos son los metabolitos especializados, y les confieren a las plantas su sabor, olor y sus propiedades medici-



nales. Por esta razón, los metabolitos especializados también son de gran importancia para los seres humanos, y un estrés que provoque su aumento en las plantas cultivadas es deseable. Pero, ¿cómo sabemos que ese estrés no perjudicará al cultivo?

El secreto está en la dosis. Hace poco más de 500 años, el médico suizo Paracelso formuló la célebre frase “la dosis hace al veneno”, que se convirtió en una máxima de la toxicología. Este enunciado evidencia que la toxicidad de una sustancia depende de la cantidad en la que se consume; así, aunque la sustancia se considere saludable, resulta dañina en una cantidad mayor de la recomendada, como ocurre con los medicamentos. Y aún más interesante es que, de modo contrario, también un factor considerado nocivo puede ser benéfico en una dosis mínima.

Con esta base, ha sido posible estimular la síntesis de metabolitos especializados en las plantas mediante su exposición a niveles bajos de estrés. Este evento, conocido como eustrés (del prefijo griego *eu*, que significa “bueno”), permite mejorar los rendimientos y la calidad de los cultivos. En el contexto actual de creciente presión demográfica y cambio climático, optimizar la producción agrícola es más urgente que nunca, ya que todos dependemos de los cultivos no sólo para nuestra alimentación, sino también para la obtención de textiles, medicamentos y otros productos esenciales. En este artículo profundizaremos en las respuestas específicas que el manejo del eustrés permite estimular en las plantas y cómo podemos aprovecharlas para desarrollar tecnologías en beneficio de nuestra sociedad.

■ **Tipos de estrés vegetal**

■ La supervivencia de las plantas depende de su aptitud para adaptarse a las condiciones ambientales. Por esa razón, los organismos vegetales son capaces de enfrentarse a muchos estresores distintos, tanto bióticos como abióticos. El primer grupo incluye seres vivos, como microorganismos, insectos, aves e incluso otras plantas, y sustancias derivadas de ellos. El segundo grupo se refiere a los factores ambientales, como la disponibilidad de agua o luz, la temperatura, e incluso ondas acústicas.

Para que una planta active su respuesta defensiva o adaptativa, primero debe percibir el estrés. Esto ocurre en la membrana celular, la capa externa de la célula vegetal. En esta membrana hay receptores, que son proteínas especiales. Cuando los receptores detectan el estrés, envían un mensaje, por medio de reacciones químicas, al núcleo de la célula. Allí, el mensaje se convierte en instrucciones que se distribuyen al resto de la planta para organizar la defensa. La **Figura 1** muestra un esquema de este proceso, conocido como señalización celular.

Algunas de estas indicaciones defensivas modifican el crecimiento de la planta, y pueden observarse a simple vista. Un ejemplo es cuando la disminución de la temperatura ambiental provoca que las hojas tomen un tono amarillento y se caigan; un fenómeno característico del otoño. Otras respuestas de las plantas al estrés no pueden observarse a simple vista, pero también son relevantes, como la defensa antioxidante. El estrés provoca la sobreproducción de compuestos oxidantes que dañan las moléculas más importantes de las células: los lípidos, los carbohidratos, las proteínas y los ácidos nucleicos. Para evitar el daño, las plantas producen antioxidantes,

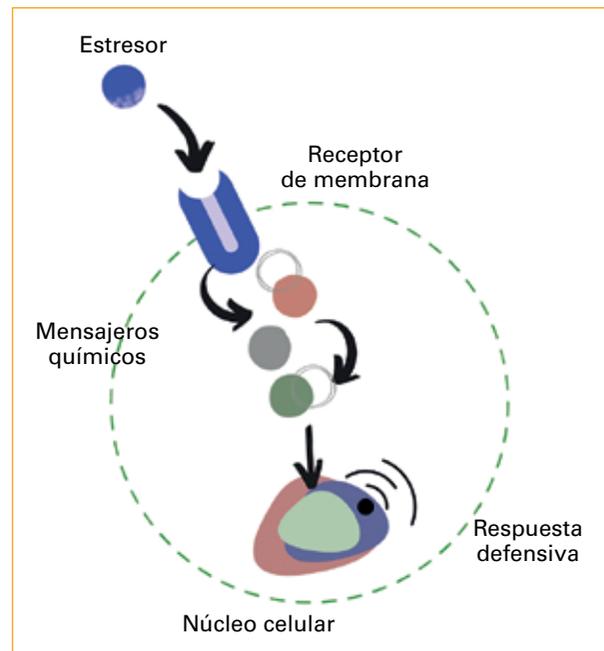


Figura 1. Señalización celular vegetal. Una vez que el estresor se percibe en la membrana, el mensaje es transmitido al núcleo, en donde se desencadena la respuesta defensiva. Fuente: elaboración propia.

moléculas que pueden encontrarse en distintas especies vegetales, como el té verde (*Camellia sinensis*) y los arándanos (*Vaccinium* spp.), y que son benéficas para sus consumidores. De hecho, en condiciones de estrés controlado, se ha encontrado que las plantas pueden producir hasta un 300% más de compuestos antioxidantes (Kandoudi y Németh-Zámboriné, 2022). Los antioxidantes y todos los metabolitos que las plantas sintetizan también se encuentran en los productos obtenidos a partir de estos cultivos, por lo que podemos encontrarlos en el vino, la leche de soya y en alimentos que contienen frutas.

■ Aplicaciones de los metabolitos especializados de las plantas

■ En realidad, una gran cantidad de productos industriales provienen de los metabolitos de defensa de las plantas. Entre tales compuestos podemos mencionar a los aceites esenciales, a los compuestos utilizados en perfumería y a los saborizantes. La industria alimentaria también hace uso de los productos vegetales para obtener pigmentos y suplementos nutricionales que se añaden a los alimentos procesados. Por ejemplo, el β -caroteno, compuesto cuya función es proteger a las plantas de la radiación solar, se añade a productos de repostería y jugos embotellados con una doble función: proporcionarles un color amarillo y otorgarles valor nutrimental. Esto último debido a que el β -caroteno en el cuerpo humano es un precursor de la vitamina A, un nutriente que favorece la vista y es necesario para mantener los huesos y la piel sanos.

Las aplicaciones de los metabolitos especializados de las plantas se extienden también a la industria farmacéutica, pues cerca de un tercio de los medicamentos provienen de plantas y sus derivados. Para su uso, los metabolitos pueden extraerse del material vegetal y purificarse, o el material vegetal puede consumirse directamente para obtener el efecto terapéutico, esto es, la fitoterapia. Quizás el ejemplo más célebre es el del ácido acetilsalicílico, registrado originalmente por la empresa Bayer con el nombre de Aspirina en 1899. La fuente natural de este medicamento es la corteza del sauce blanco (*Salix alba* L.),



un árbol cuyos primeros registros de uso medicinal se remontan hasta hace 4000 años. Algunos otros medicamentos notorios derivados de plantas son el paclitaxel (anticancerígeno), la morfina (sedante), la quinina (antimalárico) y la reserpina (antihipertensivo). Otros ejemplos de metabolitos especializados de plantas y sus usos pueden observarse en la **Figura 2**.

Entre los metabolitos especializados de las plantas, hay otros cuya función principal es la comunicación celular. Estos compuestos pueden llevar mensajes químicos a tejidos cercanos de la misma planta o de otras, generando respuestas defensivas preven-

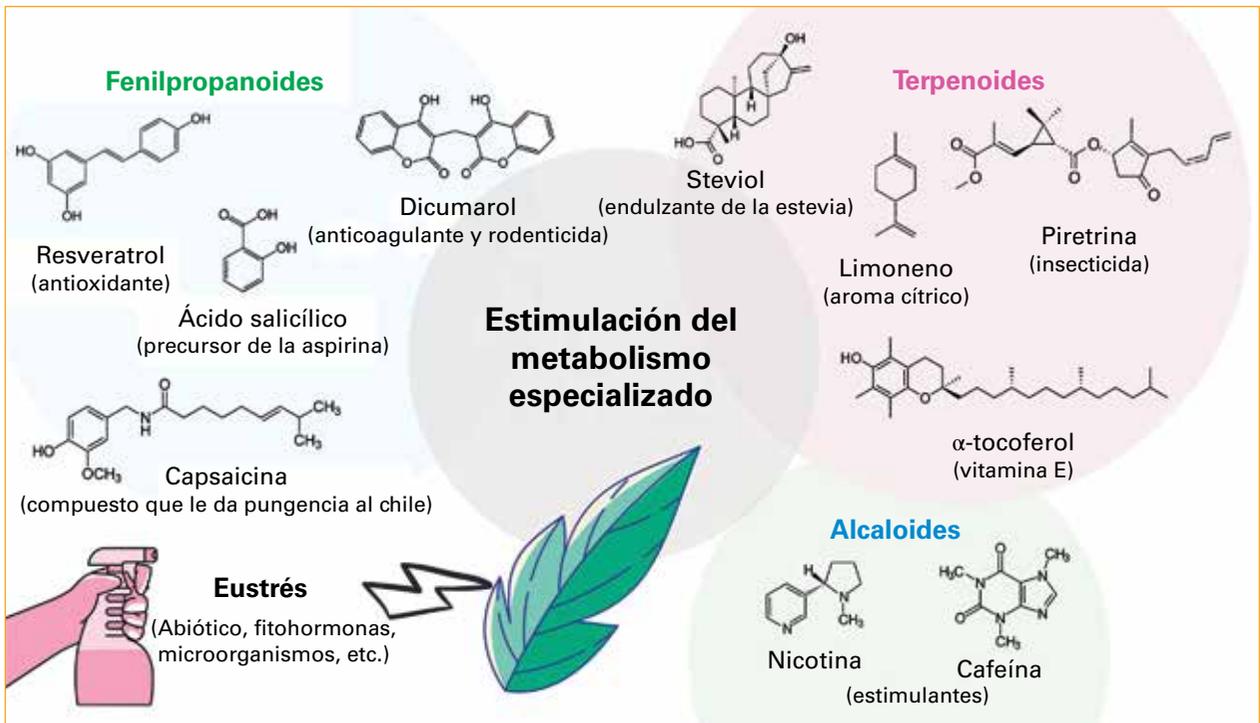


Figura 2. Estimulación del metabolismo especializado mediante el manejo del eustrés. Las plantas sintetizan una gran variedad de compuestos químicos para contrarrestar los efectos del estrés. Muchos de ellos tienen aplicaciones relevantes para la industria alimentaria y farmacéutica. Fuente: elaboración propia.

tivas. Dado que todas las etapas del desarrollo de las plantas están determinadas por cambios en la concentración de estos metabolitos, es común referirse a ellos como hormonas vegetales o fitohormonas o reguladores del crecimiento. Las fitohormonas permiten controlar el desarrollo de las plantas para su explotación agrícola, y su aplicación también causa un tipo de eustrés vegetal.

■ Manejo del eustrés vegetal

Hasta este punto hemos revisado cómo el estrés estimula el metabolismo vegetal y genera respuestas defensivas en las plantas desde un punto de vista bioquímico. En esta sección explicaremos cómo puede utilizarse este conocimiento para desarrollar tecnologías.

Existen varias formas de exponer los cultivos a condiciones controladas de estrés. La **Figura 3** ilustra algunos ejemplos de estrés, como la limitación de los riegos en ciertas etapas del desarrollo o las podas programadas. Las fitohormonas pueden aplicarse

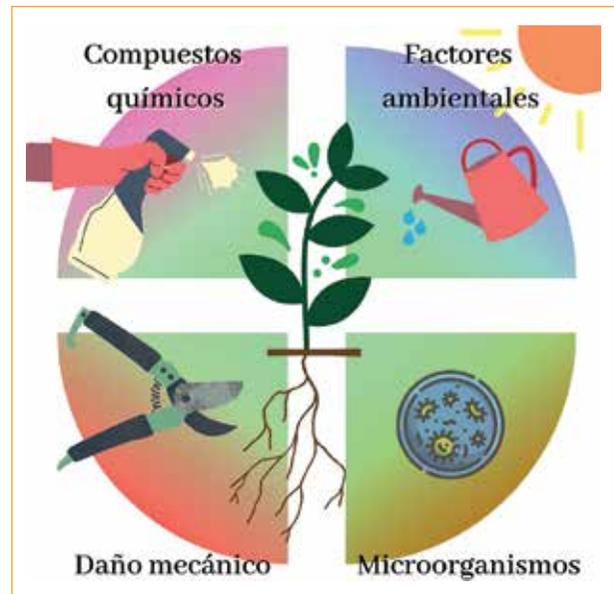


Figura 3. Tipos de estrés vegetal usados en tecnologías agrícolas. Las plantas pueden exponerse deliberadamente a estresores mediante el daño mecánico, la aspersión de compuestos químicos, la inoculación de microorganismos y el control de factores ambientales tales como el riego, la temperatura y la exposición solar. Fuente: elaboración propia.

en las hojas por aspersión, de la misma manera que otros estresores de naturaleza química y su aplicación en cultivos pueden aumentar hasta en un 98 % la producción de aceites esenciales (Kandoudi y Németh-Zámoriné, 2022). Sin embargo, el control preciso de condiciones como la temperatura o la exposición solar requiere de herramientas más sofisticadas, como invernaderos de alta tecnología.

Los organismos vivos también pueden emplearse como estresores bióticos para la agricultura. Las plantas son capaces de percibir microorganismos del suelo, lo que desencadena una respuesta defensiva. Esta respuesta suele incluir la síntesis de fitohormonas, que actúan regulando el metabolismo y el crecimiento del cultivo. Adicionalmente, algunos microorganismos benéficos se alimentan de compuestos insolubles del suelo y los transforman en nutrientes que las plantas pueden absorber, funcionando como un fertilizante biológico. Por esas razones, la inoculación de ciertos microorganismos en el suelo es una práctica cada vez más utilizada que trae beneficios como la protección contra otros

microorganismos y el aumento de la productividad de los cultivos. Estas tecnologías ya se aplican en el campo mexicano. Un ejemplo es la inoculación de semillas de maíz con *Trichoderma asperellum*, un hongo microscópico que estimula la respuesta inmune de la planta y la protege contra ataques de otros hongos, como los del género *Fusarium*, cuyo crecimiento puede inhibir hasta en un 65 % (Silva-Martínez y cols., 2016).

Un ejemplo novedoso de tecnología para hacer incidir estresores en las plantas es el uso de nanopartículas. Las nanopartículas son pequeñísimas estructuras preparadas en el laboratorio a partir de distintos compuestos químicos. Su aplicación es sencilla, pues pueden suspenderse en un medio acuoso, lo que permite su aspersión sobre las hojas. El empleo de nanopartículas ha permitido el desarrollo de una variedad de agroquímicos en nanoescala, tales como fertilizantes y plaguicidas. Además, gracias a que las nanopartículas poseen un área superficial mucho mayor, pueden tener el mismo efecto que los productos convencionales aun cuando se apliquen en menor



concentración. Esto reduce la cantidad de sustancias nocivas liberadas en el ecosistema y disminuye el impacto ambiental de la agricultura.

Es importante considerar que los niveles de estrés necesarios para obtener una respuesta positiva en las plantas varían según la especie, la etapa de desarrollo y los objetivos buscados. Sin embargo, es posible identificar generalidades que permitan diseñar tratamientos prácticos aplicables a la agricultura. Estas estrategias también pueden implementarse en nuestros jardines. Por ejemplo, una suculenta del género *Echeveria*, *Sedum* o *Kalanchoe* adquirirá una atractiva tonalidad rojiza si se expone al sol durante todo el día. En cambio, si preferimos que conserve un color verde, basta con colocarla en semisombra durante la mitad del día. De manera similar, disolver una aspirina o una cucharadita de agua oxigenada en un litro de agua y usar esta solución para asperjar las plantas cada quince días hará que luzcan más saludables ¡e incluso que produzcan más flores!



Biorreactor
Sistema de producción que funciona a base de una conversión biológica.

■ ■ ■ **Perspectivas**

■ La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024) estima que anualmente se pierden 109 millones de toneladas de productos agrícolas debido a eventos climáticos extremos. Por esta razón, un efecto muy relevante del manejo del eustrés es que puede incrementar la tolerancia de las plantas a otros estresores. Al activarse la defensa de una planta, el efecto protector puede mantenerse durante un tiempo, o generar una “memoria defensiva”. Esto último protege a la planta ante nuevos episodios estresantes que ocurran a mediano o largo plazo. De esta manera, una exposición temprana al eustrés podría permitir la sobrevivencia de una planta en condiciones cambiantes, o sea adaptarse, lo que representa una ventaja ante el cambio climático.

El aumento de la tolerancia al estrés también favorece a la fitorremediación, que consiste en usar plantas para recuperar sitios contaminados. Para este fin se utilizan especies vegetales con una capacidad extraordinaria de acumular sustancias tóxicas como metales pesados, hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. Una mayor tolerancia de las plantas al estrés que les causan los contaminantes aumenta su límite de absorción de éstos, lo que acelera la descontaminación del sitio.

Finalmente, otra técnica diferente de la agricultura convencional que también puede beneficiarse del manejo del eustrés es el cultivo de tejidos vegetales en medios sintéticos. La estimulación de la síntesis de metabolitos especializados en los cultivos celulares, en los que se controlan los componentes del medio, mejora la productividad de metabolitos específicos en los **biorreactores** de células vegetales. Esto conviene a las industrias farmacéutica y alimentaria e indirectamente favorece a las poblaciones naturales de plantas, pues suelen ser explotadas por el valor de sus metabolitos, a veces hasta el borde de la extinción.

■ ■ ■ **Conclusión**

■ El manejo del eustrés en las plantas responde a la necesidad de producir alimentos para la población;

sin embargo, esta técnica tiene diversas aplicaciones. Exponiendo los cultivos a condiciones controladas de estrés podemos mejorar su productividad, así como incrementar su valor nutricional y medicinal. Adicionalmente, el manejo del eustrés puede preparar a una planta para sobrevivir al ataque de patógenos, a la toxicidad del medio y al cambio climático.

Mucho se ha investigado en torno a la fisiología del estrés vegetal; sin embargo, la complejidad de los sistemas vivos hace que la resolución de una incógnita desvele otras nuevas. Lo que sabemos hasta ahora nos ha permitido encontrar numerosas soluciones creativas y aún hay mucho más por descubrir en este maravilloso ámbito del estudio de la vida. Por esa razón, es necesario fomentar la generación de tecnología en esta frontera del conocimiento mediante la formación de investigadores y la participación de la sociedad en el quehacer de la ciencia.

Amanda Kim Rico Chávez

Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro.
amanda.rico@uaq.mx

Ramón Gerardo Guevara González

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.
ramon.guevara@uaq.mx

Lecturas recomendadas

- Castillo-España, P., I. Perea-Arango, J. J. Arellano-García y S. Valencia-Díaz (2017), “Qué son y para qué sirven los metabolitos de las plantas”, *Ciencia y Desarrollo*, 43(288). Disponible en: <<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=227>>, consultado el 21 de abril de 2025.
- Cordonnier, M.-N. (2020), “La epigenética, moduladora clave de la evolución”, *Investigación y Ciencia*, 520:70-75.
- FAO (2024), *Repercusiones de los desastres en la agricultura y la seguridad alimentaria 2023: Evitar y reducir las pérdidas mediante la inversión en la resiliencia*, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Kandoudi, W. y É. Németh-Zámboriné (2022), “Stimulating secondary compound accumulation by elicitation: Is it a realistic tool in medicinal plants in vivo?”, *Phytochemistry Reviews*, 21:2007-2025.
- Moreno, M. J. (2016), “El estrés no es sólo cosa de humanos”, *Cuaderno de Cultura Científica* [en línea]. Disponible en: <<https://culturacientifica.com/2016/11/03/estres-no-solo-cosa-humanos/>>, consultado el 21 de abril de 2025.
- Rico-Rodríguez, L. y A. Ortega-Rubio (2017), “Paradojas de la ciencia: el polémico ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) ‘Nada es veneno, todo es veneno; la diferencia está en la dosis’ Paracelsus”, *Ciencia y Desarrollo*, 43(291). Disponible en: <<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=282>>, consultado el 21 de abril de 2025.
- Silva-Martínez, K. L., R. Allende-Molar, D. Vázquez-Luna et al. (2016), “Antagonismo *in vitro* de *Trichoderma asperellum* contra *Fusarium* sp., agente causal de gomosis en cítricos”, *Agroproductividad*, 9(6):20-25.