

Artículo Técnico

Del estrés oxidativo a la bioestimulación:

Fortaleciendo la resiliencia de los cultivos frente al déficit hídrico

El déficit hídrico es uno de los factores que más limita la productividad agrícola. Antes de que aparezcan síntomas visibles de marchitez o reducción del crecimiento, las plantas activan diversos mecanismos fisiológicos de defensa, como la disminución de la apertura estomática y la reducción de la actividad fotosintética.

Sin embargo, uno de los efectos más importantes y menos visibles de la sequía es la generación de estrés oxidativo, un proceso asociado con la acumulación excesiva de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS). La capacidad de los cultivos para controlar estas moléculas determina en gran medida su supervivencia, productividad y calidad bajo condiciones ambientales adversas.

Por: IA Leonardo Santos Maldonado

Biological Lead, Andean Region
Yara Latin America

Por esta razón, comprender los mecanismos antioxidantes naturales de las plantas y el papel de la nutrición y los bioestimulantes resulta fundamental para mejorar la resiliencia de los cultivos frente al estrés hídrico.

Estrés hídrico y generación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS)

Las plantas producen pequeñas cantidades de especies reactivas de oxígeno durante procesos normales como la fotosíntesis y la respiración. En condiciones normales, estas moléculas participan en procesos de señalización celular y son controladas eficientemente por mecanismos antioxidantes.

Cuando ocurre sequía, altas temperaturas o elevada demanda evaporativa, el funcionamiento de los cloroplastos y mitocondrias se altera, aumentando significativamente la producción de ROS.

Las principales especies reactivas de oxígeno son:

- Radical superóxido (O_2^-)
- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)
- Oxígeno singlete (1O_2)
- Radical hidroxilo ($OH\cdot$)

Durante la sequía, el cierre estomático limita la entrada de CO_2 , reduciendo la fotosíntesis. Como consecuencia, parte de la energía absorbida por la planta no puede utilizarse adecuadamente y termina favoreciendo la formación de ROS.

Cuando estas moléculas se acumulan por encima de la capacidad antioxidante de la planta, se desarrolla el llamado **estrés oxidativo**, que puede generar:

- Peroxidación de membranas celulares.
- Daño en cloroplastos.
- Degradación de clorofila.
- Alteración de enzimas metabólicas.
- Reducción del crecimiento y acumulación de biomasa.
- Disminución del rendimiento y la calidad de la cosecha.

Por ello, la sequía no debe considerarse únicamente una limitación de agua, sino también un problema asociado al desequilibrio oxidativo celular.

Sistema antioxidante: defensa natural de las plantas

Las plantas poseen sistemas antioxidantes altamente especializados



para neutralizar las ROS y proteger las estructuras celulares. Estos mecanismos se clasifican en dos categorías principales:

1. Antioxidantes enzimáticos

Representan la primera línea de defensa frente al estrés oxidativo.

Cuadro 1. Principales antioxidantes enzimáticos

Enzima/Sistema	Función principal	Importancia bajo sequía
Superóxido dismutasa (SOD)	Convierte el radical superóxido (O_2^-) en peróxido de hidrógeno (H_2O_2).	Primera barrera antioxidante frente al estrés.
Catalasa (CAT)	Degrada el H_2O_2 transformándolo en agua y oxígeno.	Evita la formación de radicales hidroxilos altamente tóxicos.
Sistema glutatión (GSH)	Participa en la detoxificación de ROS mediante el ciclo ascorbato-glutatión.	Protege proteínas, regula procesos redox y contribuye a la señalización celular.

2. Antioxidantes no enzimáticos

Complementan la acción de las enzimas antioxidantes y ayudan a proteger las membranas celulares.

Entre los más importantes se encuentran:

- Ácido ascórbico (Vitamina C)
- Tocoferoles (Vitamina E)
- Carotenoides
- Flavonoides
- Compuestos fenólicos

Estos compuestos capturan radicales libres y reducen el daño oxidativo en diferentes tejidos vegetales.

Nutrición mineral y fortalecimiento de las defensas antioxidantes

La eficiencia del sistema antioxidante depende en gran medida del estado nutricional de la planta. Diversos nutrientes intervienen directamente en la formación o activación de enzimas relacionadas con la defensa frente a las ROS.

Cuadro 2. Función de los nutrientes en la respuesta antioxidante

Nutriente	Función principal en el sistema antioxidante
Zinc (Zn)	Cofactor de la enzima Cu/Zn-SOD. Favorece la actividad antioxidante y la estabilidad de membranas.
Manganeso (Mn)	Componente de la Mn-SOD localizada en cloroplastos. Protege el aparato fotosintético.
Cobre (Cu)	Participa en diversas enzimas antioxidantes y ayuda a conservar pigmentos fotosintéticos.
Hierro (Fe)	Forma parte de enzimas del metabolismo oxidativo y de algunas isoformas de SOD.
Azufre (S)	Esencial para la síntesis de cisteína, metionina y glutatión, uno de los antioxidantes más importantes.
Nitrógeno (N)	Fundamental para la síntesis de proteínas y enzimas antioxidantes; favorece la actividad fotosintética.

Una nutrición balanceada mejora la capacidad de las plantas para enfrentar períodos prolongados de sequía y reduce el impacto negativo del estrés oxidativo.

Bioestimulantes: Una estrategia complementaria

Aunque la nutrición mineral es la base de la tolerancia al estrés, actualmente los bioestimulantes constituyen una herramienta adicional para fortalecer la resiliencia de los cultivos.

Los bioestimulantes son sustancias o microorganismos que estimulan procesos fisiológicos naturales, mejorando:

- La absorción y eficiencia de nutrientes.
- La tolerancia al estrés abiótico.
- El crecimiento y desarrollo vegetal.
- El rendimiento y calidad de la producción.

A diferencia de los fertilizantes, su principal función no es aportar nutrientes sino optimizar el funcionamiento fisiológico de la planta.

Cuadro 3. Principales grupos de bioestimulantes y su contribución frente al estrés

Tipo de bioestimulante	Beneficios principales
Extractos de algas marinas	Favorecen la producción de antioxidantes y osmoprotectores; útiles frente a sequía, calor y salinidad.
Sustancias húmicas y fúlvicas	Mejoran el desarrollo radical y la absorción de nutrientes.
Hidrolizados de proteína / Aminoácidos	Apoyan la recuperación después del estrés.
Microorganismos benéficos	Incrementan la absorción de agua y la exploración radical.
Extractos vegetales	Activan mecanismos antioxidantes y vías de señalización asociadas al estrés.

YaraAmplix OPTITRAC: bioestimulación para enfrentar el estrés hídrico

Dentro de las herramientas de bioestimulación disponibles destaca **YaraAmplix OPTITRAC**, formulado para aplicaciones foliares destinadas a reducir el impacto del estrés generado por sequía y bajas temperaturas.

Su formulación combina nutrientes estratégicos y compuestos bioactivos provenientes del alga *Ascophyllum nodosum*, reconocida por su capacidad para activar mecanismos fisiológicos relacionados con la tolerancia al estrés.

Composición principal

Fracción mineral

- Nitrógeno: 5,6 %
- Potasio (K₂O): 2,3 %
- Zinc: 1,1 %
- Boro: 1,1 %

Fracción orgánica

- Manitol
- Vitaminas
- Fucodian
- Alginatos
- Aminoácidos

Beneficios potenciales

- Mayor tolerancia a sequía y estrés térmico.
- Protección contra el daño oxidativo.
- Mantenimiento de la actividad metabólica.
- Estimulación del crecimiento vegetativo.
- Mejora de floración y cuajado.
- Incremento potencial del rendimiento y la calidad.

Los compuestos bioactivos derivados de *Ascophyllum nodosum* pueden favorecer la activación de genes relacionados con mecanismos antioxidantes, ajuste osmótico y protección fotosintética.

Conclusiones

El déficit hídrico genera mucho más que una limitación en el suministro de agua, pues desencadena procesos metabólicos que conducen a la acumulación de especies reactivas de oxígeno y al desarrollo de estrés oxidativo.

La capacidad de las plantas para mantener activos sus sistemas antioxidantes es determinante para conservar la productividad bajo condiciones de sequía. En este proceso, nutrientes como zinc, manganeso, cobre, hierro, azufre y nitrógeno desempeñan funciones fun-

damentales al participar en la síntesis y activación de los mecanismos de defensa.

Asimismo, los bioestimulantes representan una herramienta complementaria de gran valor, ya que fortalecen la resiliencia fisiológica de los cultivos y contribuyen a sostener el metabolismo vegetal durante períodos de estrés. La integración de una nutrición balanceada con estrategias de bioestimulación permite mejorar significativamente la capacidad de adaptación de los cultivos frente a los desafíos climáticos actuales.

En Yara, la innovación parte de entender las necesidades de los agricultores y los desafíos que enfrentan día a día. Por eso, desarrollamos continuamente soluciones que complementan la nutrición de las plantas y responden a diferentes condiciones, desde sus necesidades nutricionales hasta situaciones de estrés. Nuestro portafolio busca ofrecer a los productores herramientas cada vez más completas para mejorar la productividad, la calidad y la resiliencia, poniendo al agricultor en el centro de cada innovación.

Bibliografía

- Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. Annual Review of Plant Biology, 55, 373-399.
- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends in Plant Science, 7(9), 405-410.
- Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiology and Biochemistry, 48(12), 909-930.
- González-Morales, S., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., García-Morales, S., & colaboradores. (2021). Plant biostimulants: A review on their effects, mechanisms and applications under abiotic stress conditions. Frontiers in Plant Science, 12, 1-25.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). Plant Physiology and Development (6th ed.). Sinauer Associates.

