

NOTA TÉCNICA

Manejo fisiotécnico y nutricional como estrategia para Incrementar rendimiento y rentabilidad de Cultivos

Autores

*¹Ing. Galo Cedeño García. M.Sc.

*²Ing. Cristian Valdivieso López. M.Sc.

Revisor.

*³Eco. Axel Guanoluisa Arteaga.

ANTECEDENTES

El cambio climático está amenazando la productividad de los cultivos en todo el mundo y se necesitan con urgencia nuevas soluciones para adaptar los cultivos a estos cambios ambientales. Las temperaturas elevadas provocadas por el cambio climático afectan el desarrollo y los procesos fisiológicos de las plantas que, en última instancia, repercuten en el rendimiento y la calidad de los cultivos. La fotosíntesis es el proceso principal que conduce a la producción primaria en la biosfera. Hay un total de 7000 mil millones de toneladas de CO₂ en la atmósfera y la fotosíntesis fija más de 100 mil millones de toneladas al año. El CO₂ asimilado por el aparato fotosintético es la base de la producción de cultivos y, por tanto, de la alimentación animal y humana. Esto ha llevado a un renovado interés en la fotosíntesis como un objetivo para aumentar la producción de plantas y ahora hay cada vez más evidencia que muestra que la estrategia de mejorar los rasgos fotosintéticos puede incrementar la producción agrícola.

Sin embargo, la fotosíntesis y el aparato fotosintético están condicionados por variables ambientales como la disponibilidad de agua, temperatura, CO₂, salinidad y ozono. Las raíces de las plantas son responsables de la absorción de agua y nutrientes, pero los cambios en la temperatura del suelo alteran este proceso limitando el crecimiento de los cultivos. Con el pronóstico climático de las variables prevista, el desarrollo de cultivos con un sistema foliar y de raíces eficiente mejor adaptado a las condiciones cambiantes del suelo y del medio ambiente es crucial para mejorar la productividad de los cultivos. El rendimiento actual de los cultivos es insuficiente para satisfacer la demanda mundial de alimentos en 2050, donde se predice un aumento de la población en alrededor de 9 mil millones de personas. Se debe lograr una producción de cultivos mayor y más consistente en un contexto de estrés climático que limita

* Docentes – Investigadores de Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López - ESPAM MFL

¹ Especialista en Fisiología, nutrición y producción de cultivos

² Especialista en Riego y uso eficiente del agua en cultivos

³ Subdirector de Planificación y Ordenamiento Territorial, Gobierno Provincial de Manabí-Economía Agrícola.

los rendimientos, debido a cambios en el comportamiento de plagas y patógenos, precipitaciones, olas de calor y otros extremos climáticos. En consecuencia, la protección del rendimiento frente a factores ambientales adversos mediante el aumento de la resiliencia biótica o abiótica de los cultivos y la mejora del rendimiento al alterar el crecimiento/desarrollo son las potenciales herramientas en las ciencias agrícolas para aumentar el rendimiento.

PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y NIVELES DE PRODUCTIVIDAD

El potencial de producción agrícola está determinado por la interacción entre el genotipo (cultivar o híbrido) y el ambiente (suelo y clima), así como por la fitotecnia de cultivo. El rendimiento, la masa de producto agrícola cosechado en un área específica, está influenciado por varios factores. Estos factores se agrupan en tres categorías básicas conocidas como tecnológicas (prácticas agrícolas, decisión gerencial, etc.), biológicas (enfermedades, insectos, malezas) y ambientales (condición climática, fertilidad del suelo, topografía, calidad del agua, etc.). Los factores genéticos y ambientales determinan el rendimiento de los cultivos. En este sentido, existen diferentes niveles de productividad agrícola, de acuerdo a la cantidad de factores limitativos que se encuentren en el proceso y que conllevan a la manifestación de brechas de rendimiento (**Figura 1**).

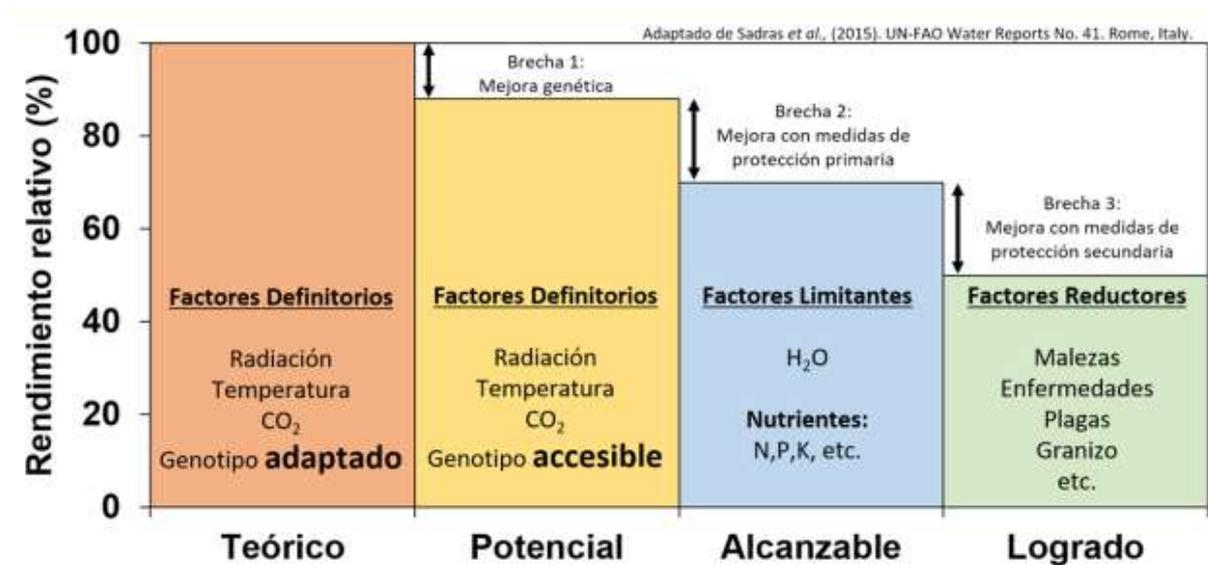


Figura 1. Brechas de rendimiento en cultivos agrícolas

El **rendimiento teórico** (100% del potencial productivo) únicamente puede conseguirse en ambientes controlados como invernaderos o casa de cultivos climatizados y automatizados, puesto que está definido por el control de factores ambientales y el potencial genético de un genotipo adaptado (**Figura 1**). Bajo condiciones de campo, cuando las condiciones ambientales son favorables, se puede llegar a obtener el máximo rendimiento posible o **rendimiento potencial** (hasta un 80% del potencial productivo), que se refiere a la productividad obtenida con el mejor nivel de tecnología y material genético disponible, bajo un manejo ideal y en un ambiente físico óptimo para la interacción de los factores determinantes de la

producción vegetal. Sin embargo, en la práctica existe una serie de factores limitantes como, la disponibilidad de agua y de nutrientes, que impiden alcanzar la producción potencial y sólo permiten la obtención de un **rendimiento alcanzable** (60 – 70 % del potencial productivo) de acuerdo a la proporción de elementos disponibles para el cultivo. Así mismo, existen otros factores que actúan como reductores, entre ellos se encuentran los problemas fitosanitarios, entre otros, que en situaciones específicas sólo permiten alcanzar un **rendimiento actual o logrado** (< del 50% del potencial productivo), determinado por la eficacia de las medidas de protección que aplique el agricultor (**Figura 1**).

La elección de un genotipo adecuado para las condiciones agroecológicas es siempre el primer factor a tomar en cuenta para el establecimiento comercial de un cultivo, puesto que la expresión de su **potencial genético** estará en función del ambiente y del manejo realizado por el productor. En este sentido, cabe mencionar que muchos agricultores realizan inversiones significativas en adquirir la mejor semilla, pero con un deficiente manejo tecnológico, esa genética no expresa su máximo potencial productivo y por ende no se consiguen los rendimientos económicos esperados. En este mismo contexto, es importante mencionar que solo alrededor del 50% de agricultores usan semilla mejorada, por lo que, el otro 50% usan semilla tradicional con menor potencial de rendimiento.

El **manejo de suelos** es otro de los aspectos técnicos que no se manejan de forma eficiente en la agricultura local. La mayoría de suelos cultivados presentan problemas de baja fertilidad, con contenidos deficientes de macro y micronutrientes. Además, muchos suelos tienen problemas de salinidad, acidez, alcalinidad, compactación, deficiente drenaje y desequilibrio de bases, lo cual dificulta obtener rendimientos elevados. Sumado a lo anterior, otro factor que contribuye a la degradación de los suelos, es la quema de rastrojos del cultivo anterior, la cual es una práctica utilizada por el 65% de agricultores a nivel nacional, y en Manabí por más del 80% de los productores. Por otra parte, otra de las razones que limitan manejar la fertilidad del suelo y la fertilización de los cultivos de manera eficiente, es que gran parte de los agricultores jamás realizan un análisis de suelo, por lo que en la mayoría de cultivos la cantidad de productores que invierten en un análisis de suelo no llega al 20%.

La baja disponibilidad de riego y deficiente **manejo del agua**, es otro factor importante responsable de los bajos rendimientos agrícolas. En la actualidad, más del 70% de la superficie agrícola no tiene acceso a riego permanente, por lo que, la mayor parte de la agricultura depende de las lluvias. Sumado a lo anterior, en los últimos años debido a la crisis climática, se han venido presentado anomalías en los patrones de las precipitaciones, por lo que, dentro la época de lluvias se presentan periodos de déficit hídrico, lo cual afecta significativamente la fertilización y la nutrición del cultivos, debido a que la falta de humedad en el suelo no permite la solubilización eficiente de los fertilizantes aplicados en banda superficial. En este sentido, se afecta significativamente la productividad de los cultivos, al no existir estrategias eficientes de manejo y conservación del agua en cultivos de secano.

MANEJO FISIOTÉCNICO Y NUTRICIONAL DE CULTIVOS: PROPUESTA DE DEFINICIÓN Y FOLOSOFÍA

El **Manejo Fisiotécnico y Nutricional de Cultivos** puede definirse como el “conjunto de técnicas agrícolas destinadas a crear condiciones ideales para potenciar la expresión genética, capacidad de adaptación, desarrollo, rendimiento y calidad de los cultivos bajo los diferentes sistemas de producción y escenarios climáticos, donde particularmente la aplicación de enmiendas mejoradoras de suelo, productos bioestimulantes y nutrientes minerales se realizan de forma simultánea, en función de la fenología del cultivo, con fines de optimizar su desempeño fisiológico y maximizar el uso eficiente de nutrientes, agua y energía”. En la **figura 2**, se propone un esquema general del manejo fisiotécnico y nutricional de cultivos.

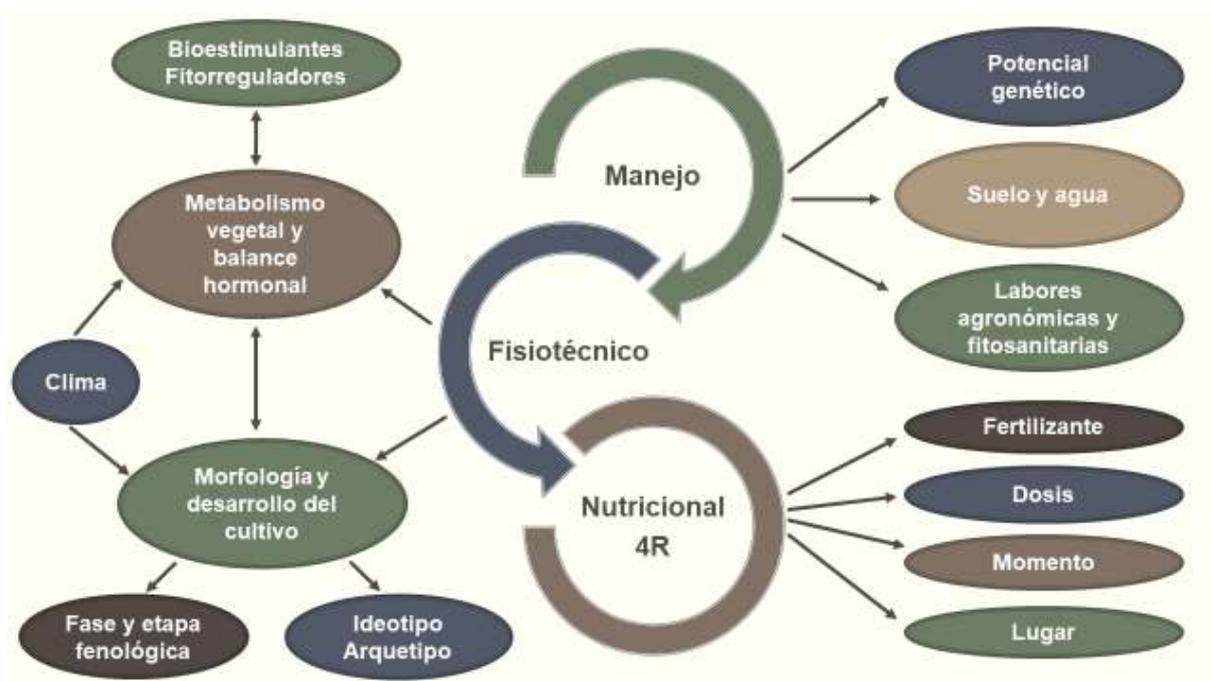


Figura 2. Esquema resumido del manejo fisiotécnico y nutricional de cultivos

Entre las técnicas agrícolas aplicadas dentro del Manejo Fisiotécnico y Nutricional de cultivos, se describen las siguientes:

Enmiendas acondicionadoras de suelo

La finalidad de aplicar enmiendas a los suelos agrícolas es proporcionar un mejor ambiente para las raíces y el crecimiento de las plantas: esto incluye la mejora de la estructura del suelo y la capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones de vida de los organismos del suelo, que son importantes para el crecimiento de los cultivos. Además, una mejor textura del suelo y un mejor

crecimiento de las raíces evitan la degradación del suelo durante las lluvias intensas o en regiones ventosas. También las enmiendas contribuyen al ciclo de nutrientes. Básicamente, cualquier material orgánico (compost, vermicompost, estiércoles, guano, harina de sangre, biochar, etc.) o inorgánico (dolomita, calcita, yeso agrícola, azufre elemental, zeolitas, harinas de rocas, rocas fosfatadas, tierra de diatomeas, hidrogeles, etc.) que se agregue al suelo y mejore su fertilidad, calidad y retención de humedad, puede considerarse como enmienda. El tipo de enmienda elegida depende completamente de cómo se necesite cambiar el suelo. Mediante el uso de enmiendas de suelo, casi todos los tipos de suelo pueden volverse fértiles.

Enmiendas para suelos ácidos

Aproximadamente el 30% de la superficie terrestre total del mundo consiste en suelos ácidos, y se ha estimado que más del 50% de las tierras cultivables potenciales del mundo son ácidas. El aluminio (Al^{3+}) en estos suelos se solubiliza en formas iónicas, especialmente cuando el pH del suelo desciende por debajo de 5. Se ha demostrado que estas formas iónicas de Al^{3+} son muy tóxicas para las plantas, inicialmente causando la inhibición del alargamiento de las raíces al destruir la célula, la estructura del ápice de la raíz y, por lo tanto, afecta la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces; como consecuencia, el crecimiento y productividad de las plantas se ve seriamente obstaculizado. Para producir un mejor rendimiento de los cultivos en suelos ácidos, se recomienda a los agricultores que apliquen materiales alcalinos o **enmiendas encalates** como el carbonato de Ca (calcita), carbonato doble de Ca y Mg (dolomita), carbonato de Mg (magnesita), óxido de Ca (cal viva), hidróxido de Ca (cal apagada) para aumentar el pH del suelo, eliminar las formas tóxicas de Al^{3+} y promover una mayor absorción de nutrientes minerales esenciales.

La acidez del suelo se clasifica como: A) **acidez activa** que se refiere al hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo; B) **acidez intercambiable** que se refiere al H^+ y Al^{3+} intercambiable, retenido en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas; C) **acidez no intercambiable** que hace referencia al H^+ enlazado covalentemente a las superficies de minerales arcillosos de carga variable; y D) **acidez potencial** que es la suma de la acidez intercambiable + acidez no intercambiable. Por estas razones, se recomienda a los agricultores que cuando envíen muestras para análisis químico de suelo en laboratorios públicos o privados, soliciten la medición de pH en agua y en KCl, con la finalidad de conocer tanto la acidez presente en la solución del suelo y en el complejo de cambio, y de esta forma poder emitir una recomendación de encalado más precisa y ajustada.

Enmiendas para suelos alcalinos

Los suelos alcalinos, que son muy comunes en los climas semiáridos y áridos, cubren más del 25% de la superficie terrestre. Estos suelos son típicamente muy porosos, drenan libremente y están saturados con carbonato y bicarbonato. La abundancia de Ca^{2+} en la solución del suelo limita la solubilidad del P al

formar compuestos de Ca-P escasamente solubles. Además, el alto contenido de Ca^{2+} bloquea la absorción de nutrientes importantes como Fe y Zn. En suelos alcalinos el pH es >8.5 , con una concentración de sodio intercambiable $>15\%$. En suelos alcalinos el azufre elemental es una de las enmiendas que más se aplican como material acidificante para bajar pH y mejorar la disponibilidad de nutrientes, la fertilidad del suelo y rendimiento de cultivos. Otras enmiendas utilizadas para mejorar la fertilidad de suelos alcalinos, es la aplicación de ácidos orgánicos como los húmicos, fulvicos y productos derivados de la industria azucarera (melaza y vinaza). La aplicación de enmiendas orgánicas también ayuda a mejorar la fertilidad química de los suelos alcalinos.

Enmiendas para suelos salinos

La salinización del suelo es uno de los principales factores de estrés ambiental que obstaculizan el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, afecta más de 900 millones de hectáreas de tierra en todo el mundo debido a la acumulación excesiva de sales. en todo el mundo. La salinidad induce un amplio espectro de alteraciones fisiológicas y bioquímicas de las plantas, lo que provoca una disminución del potencial hídrico en la solución del suelo, desequilibrio iónico, efectos de iones específicos y una mayor acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) que causan daños a nivel celular. Las sales más comunes se encuentran en combinaciones de los cationes de sodio, calcio, de magnesio y de potasio con los aniones de cloro, sulfato y carbonatos. Los suelos salinos se clasifican en:

Salinos: conductividad eléctrica (CE) $>4 \text{ dS m}^{-1}$, porcentaje de sodio intercambiable (PSI) $<15\%$, y pH de 7 – 8.5.

Sódicos: conductividad eléctrica (CE) $<4 \text{ dS m}^{-1}$, porcentaje de sodio intercambiable (PSI) $>15\%$, y pH de 8.5 – 10.

Salino-sódico: conductividad eléctrica (CE) $>4 \text{ dS m}^{-1}$, porcentaje de sodio intercambiable (PSI) $>15\%$, y pH <8.5 .

Por lo tanto, para mejorar la productividad de los suelos salinos, la aplicación de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y las enmiendas bio-orgánicas (uso combinado de materiales orgánicos, como compost, vinaza, cachaza y microorganismos eficientes) se han reconocido continuamente para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos salinos.

Uso de biochar o biocarbón como enmienda mejoradora de suelo

La degradación del suelo se ha convertido en un problema global emergente que limita la producción sostenible de cultivos de secano. La erosión del suelo, la acidez del suelo, la baja fertilidad, la contaminación inorgánica / orgánica y la salinización desafían la seguridad alimentaria y provocan graves limitaciones económicas. La tecnología de biochar se muestra prometedora para mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del suelo, así como para reducir los desechos y producir energía como subproducto. Pero ¿qué es exactamente el biocarbón y de qué está hecho?

El biocarbón es una sustancia similar al carbón vegetal que se obtiene al quemar material orgánico de desechos agrícolas y forestales (también llamado biomasa) en un proceso controlado llamado pirólisis. Aunque se parece mucho al carbón vegetal común, el biocarbón se produce mediante un proceso específico para reducir la contaminación y almacenar carbono de manera segura. Durante la pirólisis, los materiales orgánicos, como astillas de madera, hojarasca o plantas muertas, se queman en un recipiente con muy poco oxígeno. A medida que los materiales se queman, liberan poco o nada de vapores contaminantes. Durante el proceso de pirólisis, el material orgánico se convierte en biocarbón, una forma estable de carbono que no puede escapar fácilmente a la atmósfera. La energía o el calor creado durante la pirólisis se pueden capturar y utilizar como una forma de energía limpia. El biocarbón es mucho más eficiente para convertir el carbono en una forma estable y es más limpio que otras formas de carbón vegetal.

La aplicación de biochar mejora la calidad del suelo a través de cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, lo que aumenta sustancialmente el rendimiento de los cultivos. El rendimiento de cultivos se puede mejorar mediante el aumento de la disponibilidad de nutrientes y la retención de humedad. Además, el biochar puede ayudar a controlar la acidez/alcalinidad/salinidad inadecuada del suelo y a remediar un suelo contaminado mientras aumenta la retención de carbono orgánico del suelo, el contenido de agua reduce los requisitos de fertilizantes, mejora el microbiota del suelo y aumenta el rendimiento de los cultivos. Además, el uso de biocarbón tiene muchos beneficios ambientales, beneficios económicos y un papel potencial que desempeñar en los sistemas de crédito de carbono. Se recomienda encarecidamente el biochar como una de las mejores prácticas de gestión para afrontar los retos de la agricultura de secano.

Nutrición vegetal y uso eficiente de nutrientes

Un NUTRIENTE es un elemento químico considerado esencial para las plantas

Se considera que un elemento es esencial para las plantas porque cumple con los tres criterios siguientes:

1. La deficiencia del elemento impide que la planta complete su ciclo de vida
2. Debe participar directamente en el metabolismo de la planta
3. No puede ser reemplazado con otro que tiene propiedades similares

Hasta la fecha se han identificado 17 elementos químicos como nutrientes esenciales para las plantas, los cuales son:

- Orgánicos esenciales: Carbono (C), Hidrógeno (H) y Oxígeno (O)
- Macronutrientes minerales primarios: Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K)
- Macronutrientes minerales secundarios: Azufre (S), Magnesio (Mg) y Calcio (Ca)

- Micronutrientes minerales: Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Boro (B), Molibdeno (Mo), Cloro (Cl) y Níquel (Ni)

Existen otros elementos químicos que han mostrado ser beneficiosos para las plantas en ciertas dosis, pero que en ningún caso pueden ser considerados esenciales. Estos elementos son: Silicio (Si), Sodio (Na), Cobalto (Co), Selenio (Se), etc.

En ausencia de una adecuada reposición de nutrientes minerales esenciales mediante la fertilización, puede ocasionar una disminución subsiguiente de la disponibilidad de nutrientes del suelo, lo que ejerce un efecto negativo sobre el rendimiento. La limitación del rendimiento también podría ocurrir como consecuencia de la existencia de niveles intrínsecamente bajos de nutrientes en los suelos. Las estrategias para superar la baja disponibilidad de nutrientes en los suelos se basan principalmente en el uso de fertilizantes y el mejoramiento de cultivos. En este contexto, es indispensable que el agricultor invierta en el diagnóstico de la fertilidad del suelo y el estado nutricional del cultivo, a través de análisis químico de suelo y de tejido vegetal, dado que estas herramientas permitirán al técnico asesor emitir recomendaciones de fertilización y nutrición más ajustadas a la demanda del cultivo.

La eficiencia en el uso de nutrientes (EUN) es un concepto muy importante en la evaluación de los sistemas de producción de cultivos. El principal punto para considerar es la respuesta de los fertilizantes aplicados y su eficiencia de uso para obtener el máximo rendimiento. La eficiencia en el uso de nutrientes de los fertilizantes aplicados es muy baja debido a muchas razones como escurrimiento superficial, lixiviación, volatilización, desnitrificación y fijación de micronutrientes en el suelo debido a un pH muy alto. La mayor eficiencia en el uso de nutrientes siempre ocurre en las partes más bajas de la curva de respuesta del rendimiento, donde los insumos de fertilizantes son los más bajos, pero la efectividad de los fertilizantes para aumentar el rendimiento de los cultivos y optimizar la rentabilidad del agricultor no debe sacrificarse por el mero hecho de la eficiencia. Debe haber un equilibrio entre la eficiencia óptima en el uso de nutrientes y la productividad óptima de los cultivos.

Por lo tanto, es necesario comprender las mejores prácticas de gestión del suelo y el agua que ayuden a aumentar la eficiencia en el uso de nutrientes y el rendimiento mediante el uso de menos fertilizantes para que se pueda lograr el objetivo de la agricultura sostenible. La eficiencia en el uso de nutrientes se puede optimizar mediante las mejores prácticas de manejo de fertilizantes. Estas prácticas son conocidas como las estrategias de las 4R de la nutrición vegetal. Las 4R representan la **fuentes correcta** ¿Qué fertilizante se debe utilizar?, **la dosis correcta** ¿Cuántos kg ha⁻¹ se deben aplicar?, **el momento correcto** ¿En qué etapa fenológica del cultivo se debe aplicar el fertilizante? y **el lugar correcto** ¿Cómo se debe aplicar el fertilizante al suelo? Estos conceptos sirven para guiar a los agricultores hacia las prácticas de manejo que ayudan a mantener los nutrientes en el campo y en el mismo. La implementación

de las 4R ayuda a alinear los componentes económicos, ambientales y sociales del manejo de nutrientes (Figura 3).

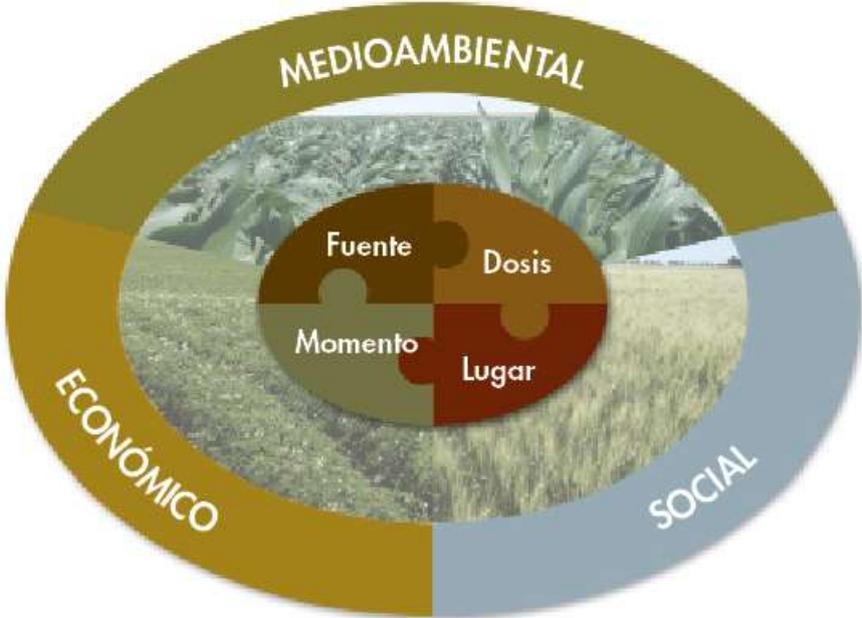


Figura 3. Las 4R de la nutrición vegetal. Fuente: International Plant Nutrition Institute (IPNI).

Cuando se habla de nutrición vegetal, por lo general se hace alusión única y exclusivamente a la nutrición mineral. Sin embargo, es importante recalcar que la nutrición vegetal abarca, además, a la nutrición lumínica, nutrición carbónica, nutrición oxigenica y nutrición microbiológica (Figura 4).

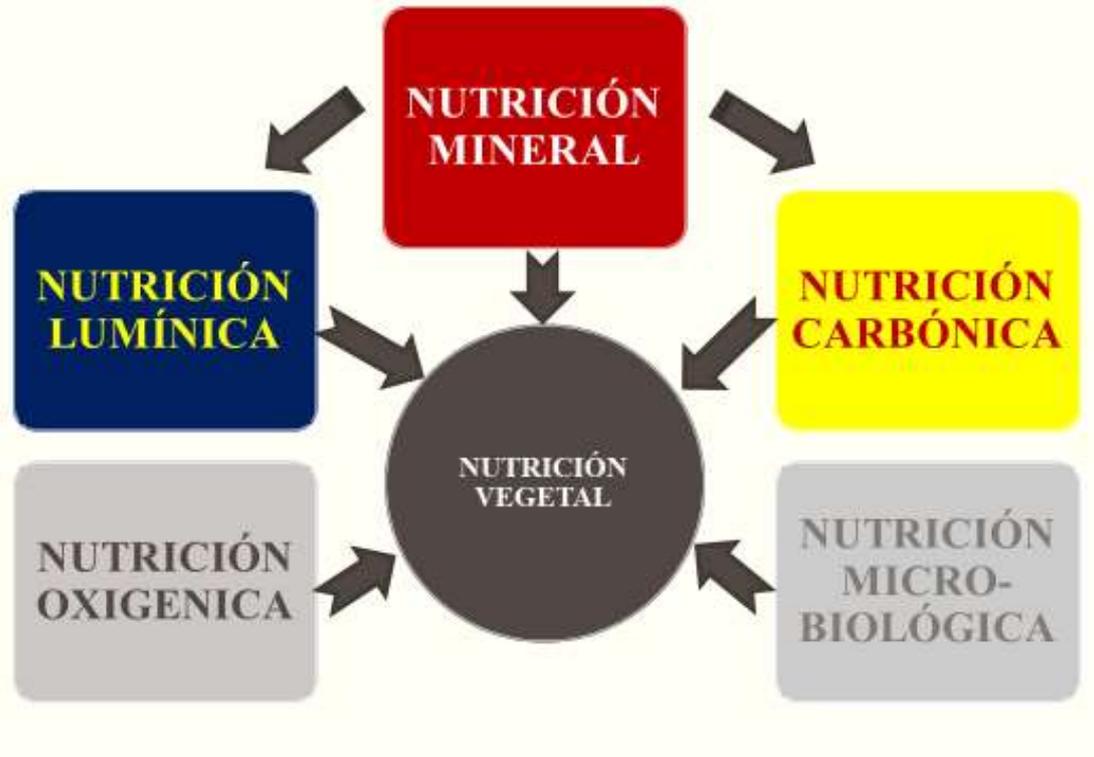


Figura 4. Esquema de la nutrición vegetal

La nutrición lumínica hace referencia al aprovechamiento de la energía luminosa como un nutriente físico que hace posible transformar la energía física de la luz en energía química estable a través de compuestos energéticos como el ATP y agentes reductores como el NADPH, que son compuestos químicos importantes para la producción de biomoléculas a través del proceso fotosintético de reducción del CO₂ ambiental a compuestos carbonatados como los azúcares y almidón. A esto último es justamente cuando nos referimos a nutrición carbónica. La nutrición oxigenica hace referencia a la respiración celular aeróbica, donde justamente el oxígeno es el aceptor final de electrones, que proporciona gran cantidad de energía metabólica en forma de ATP. La energía ATP proporcionada por la respiración celular, es de gran importancia para procesos de absorción de nutrientes minerales y otras sustancias por las raíces y las hojas.

La nutrición microbiológica, se relaciona a la interacción de las raíces con los microbios del suelo, que son los componentes clave del ciclo de nutrientes. El estado de la salud del suelo y la riqueza de la reserva de nutrientes dependen de la estructura y funciones de la comunidad microbiana del suelo. Los microbios juegan un papel importante en la movilización y absorción de nutrientes. Promueven el crecimiento de las plantas, la solubilización de fosfatos y sulfatos, la promoción del crecimiento de las raíces, la producción de sideróforos, la fijación de nitrógeno, la desnitrificación, la modulación inmunitaria, la transducción de señales y el control de patógenos y plagas que pueden dañar las raíces, limitar la absorción de nutrientes y por ende la nutrición eficiente de los cultivos.

Bioestimulantes y la bioestimulación de los cultivos

La bioestimulación vegetal es un nuevo enfoque de la agricultura. Hasta ahora, las sustancias que ayudaban al agricultor eran fertilizantes y productos fitosanitarios, cada uno de ellos con una composición química bien conocida. Los bioestimulantes, por otro lado, son mezclas de compuestos y organismos definidos principalmente por sus efectos: sus funciones beneficiosas para el productor, el agrosistema y el medio ambiente. Los bioestimulantes vegetales se han denominado con diferentes terminologías durante las últimas décadas en función de sus modos de acción variables. La definición más consensuada y reciente establece que los bioestimulantes son sustancias biológicas, microorganismos y compuestos minerales que se pueden aplicar directamente a las plantas, semillas y suelo para mejorar el crecimiento de las plantas, aumentar el rendimiento de los cultivos, reducir el estrés de las plantas y potenciar el uso eficiente de nutrientes (**Figura 5**). Con base en esta definición, los bioestimulantes vegetales se especifican sobre la base de declaraciones de funciones agrícolas e incluyen diversas sustancias naturales bioactivas: ácidos húmicos y fúlvicos, hidrolizados de proteínas animales y vegetales, extractos algas marinas y vegetales, quitosano y otras moléculas, compuestos inorgánicos

como silicio y otros minerales beneficiosos, y microorganismos beneficiosos como hongos y bacterias promotoras del crecimiento vegetal.

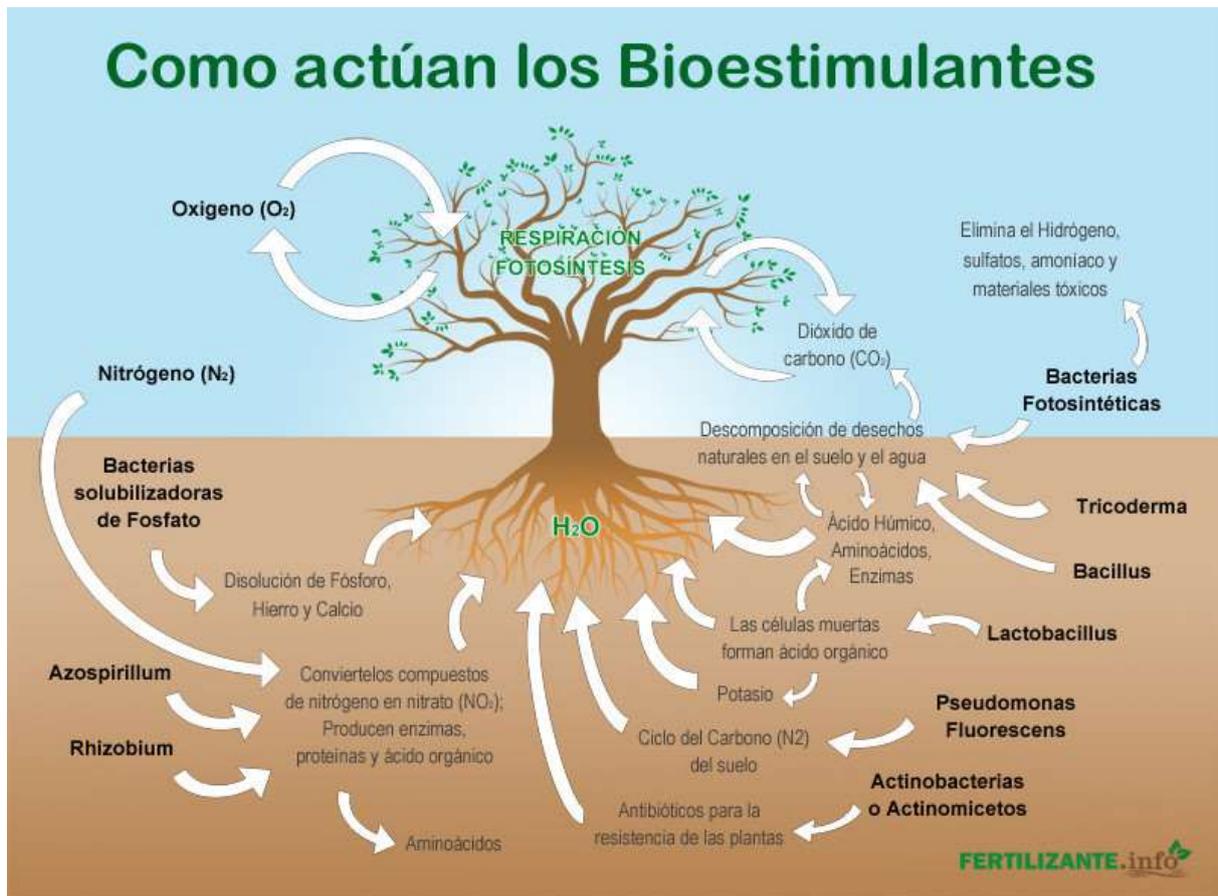


Figura 5. Efectos beneficiosos de los bioestimulantes
(Fuente: Fertilizante.info)

Sustancias húmicas

Las sustancias húmicas son constituyentes naturales de la materia orgánica del suelo, resultantes de la descomposición de residuos vegetales, animales y microbianos, pero también de la actividad metabólica de los microbios del suelo que utilizan estos sustratos. El efecto bioestimulante de las sustancias húmicas se caracterizan por cambios tanto estructurales como fisiológicos en raíces y brotes relacionados con la absorción, asimilación y distribución de nutrientes (eficiencia en el uso de nutrientes). Además, pueden inducir cambios en el metabolismo primario y secundario de las plantas relacionado con la tolerancia al estrés abiótico que modulan colectivamente el crecimiento de las plantas y potencian el rendimiento agronómico.

Acción bioestimulante de los hidrolizados de proteínas (PH)

Los hidrolizados de proteínas de origen vegetal y animal han ganado popularidad como bioestimulantes de plantas debido a su potencial para aumentar la germinación, la productividad y la calidad de una amplia gama de cultivos hortícolas y agronómicos. La aplicación de PH también puede aliviar los efectos negativos del estrés abiótico de las plantas debido a la salinidad, la sequía y los metales pesados.

Estudios recientes destinados a descubrir los mecanismos que regulan estos efectos beneficiosos indican que los PH podrían estar afectando directamente a las plantas al estimular el metabolismo del carbono y el nitrógeno e interferir con la actividad hormonal.

Los efectos indirectos también podrían desempeñar un papel, ya que los PH podrían mejorar la disponibilidad de nutrientes en los sustratos de crecimiento de las plantas y aumentar la absorción de nutrientes y la eficiencia del uso de nutrientes en las plantas. Además, los efectos beneficiosos de los PH también podrían deberse a la estimulación de los microbiomas vegetales. Las plantas están colonizadas por una variedad abundante y diversa de taxones microbianos que pueden ayudar a las plantas a adquirir nutrientes y agua y resistir el estrés biótico y abiótico. Los sustratos proporcionados por los PH, como los aminoácidos, podrían proporcionar una fuente de alimento ideal para estos microbios asociados a las plantas y de esta manera mejorar su efecto beneficioso sobre las plantas.

Extractos de algas marinas como bioestimulantes

Las algas se han utilizado tradicionalmente en la costa de Europa desde tiempos inmemoriales como fertilizantes y agentes acondicionadores del suelo. Durante las últimas dos décadas, las algas marinas se han procesado y comercializado como extractos de algas en diversas formulaciones para su uso en agricultura y horticultura. Los extractos de algas son ricos en micro y macronutrientes, polisacáridos, proteínas, ácidos grasos poliinsaturados, polifenoles, fitohormonas y osmolitos. Estos compuestos provocan múltiples efectos beneficiosos en las plantas, incluida la mejora de la germinación y el establecimiento de semillas, el crecimiento y la productividad general de las plantas, la resistencia contra el estrés biótico y abiótico y el aumento de la vida útil posterior a la cosecha. Además, los extractos de algas marinas se utilizan ampliamente en cultivos principalmente por sus efectos de promoción del crecimiento de las plantas y por su efecto mejorador de la tolerancia de los cultivos a tensiones abióticas como la salinidad, las temperaturas extremas, la deficiencia de nutrientes y la sequía.

Quitosano como bioestimulante

Los materiales a base de quitosano exhiben varias propiedades interesantes, que los hacen aplicables en muchos campos, incluida la agricultura, donde se utilizan como bioestimulantes. El quitosano induce varios genes defensivos en las plantas, como los genes relacionados con la patogénesis, como la glucanasa y la quitinasa. El quitosano se ha utilizado tanto como bioestimulante para estimular el crecimiento de las plantas y la tolerancia al estrés abiótico, como para inducir la resistencia a patógenos; sin embargo, estas respuestas son complejas y dependen de diferentes estructuras y concentraciones basadas en quitosano, así como de la especie vegetal y la etapa de desarrollo.

El quitosano se comporta como un inductor de resistencia que induce respuestas de defensa de las plantas tanto locales como sistémicas, incluso cuando se aplica a las semillas. Se demostró que el quitosano utilizado como enmienda del suelo brinda muchos beneficios a diferentes especies de plantas

al reducir el ataque y la infección de patógenos. En conclusión, el quitosano es una molécula activa que encuentra muchas posibilidades de aplicación en la agricultura, incluido el control de enfermedades de las plantas.

Bioestimulantes microbianos

Los bioestimulantes microbianos son tecnologías innovadoras capaces de asegurar el rendimiento agrícola con altos valores nutricionales, superando los efectos negativos derivados de los cambios ambientales. Un bioestimulante vegetal microbiano consiste en un microorganismo o un consorcio de microorganismos que incluye géneros como: *Azotobacter* spp., hongos micorrízicos arbusculares, *Rhizobium* spp. y *Azospirillum* spp. El uso de microorganismos beneficiosos en la agricultura está ganando popularidad en los últimos años como un enfoque sostenible para promover el crecimiento y el rendimiento de las plantas. Además, se han detectado concentraciones más altas de compuestos fenólicos, terpenoides y niveles de ácido ascórbico cuando se utilizan bioestimulantes microbianos, lo que revela el papel adicional de los bioestimulantes microbianos en la producción de alimentos de alta calidad de manera sostenible.

El uso de bioestimulantes microbianos se considera altamente eficiente como herramientas sostenibles para asegurar la estabilidad del rendimiento en condiciones de bajos insumos, en particular deficiencia de N y P (es decir, efectos de biofertilizantes), pero también como una tecnología innovadora para mejorar la tolerancia de los cultivos a los factores estresantes abióticos, en particular a las temperaturas extremas, la sequía y la salinidad. También se ha demostrado que las asociaciones simbióticas entre diversos microorganismos y raíces de plantas tienen un impacto enorme en sus respectivos crecimientos y supervivencia; La resistencia sistémica inducida (RSI) es parte del mecanismo a través del cual las bacterias y hongos que promueven el crecimiento de las plantas también estimulan la resistencia a los patógenos.

Compuestos inorgánicos como bioestimulantes

Los elementos químicos que promueven el crecimiento de las plantas y que pueden ser esenciales para determinados taxones, pero que no son necesarios para todas las plantas, se denominan elementos beneficiosos. El fosfito, una forma reducida de fosfato, está emergiendo como un nuevo bioestimulador de los cultivos. Aunque todavía no hay consenso sobre su función fisiológica como fuente de P para la nutrición de las plantas, la evidencia experimental ha demostrado que el fosfito puede actuar como biocida y afectar la producción y productividad de las plantas. En la actualidad, el fosfito se perfila como un potencial inductor de respuestas metabólicas beneficiosas en las plantas, ya que ha demostrado su eficacia frente a diferentes factores de estrés y ha mejorado el rendimiento y la calidad de los cultivos. Aunque el silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, no se considera un elemento esencial para la nutrición de las plantas. Sin embargo, resultados de investigaciones como la

experiencia práctica abogan por un impacto beneficioso del Si en el crecimiento y desarrollo de muchas especies de plantas, especialmente cuando se exponen a estrés abiótico o biótico. Actualmente, el Si se aplica en algunos cultivos comerciales con el objetivo de inducir resistencia a estreses abióticos, enfermedades y patógenos, pero el uso de este elemento como bioestimulante en agricultura puede ampliarse aún más.

El Si alivia el estrés por salinidad, sequía y deficiencia de nutrientes, así como el estrés asociado con las condiciones climáticas, minimiza la toxicidad de metales y metaloides y puede retrasar los procesos de senescencia de las plantas. Sin embargo, los mecanismos que subyacen al alivio del estrés abiótico mediado por Si siguen siendo poco conocidos. Los mecanismos clave involucrados en el alivio del estrés abiótico mediado por Si en plantas superiores incluyen: (1) deposición de sílice dentro de los tejidos de la planta que proporciona resistencia mecánica y erección a las hojas y modula la movilidad de nutrientes y agua dentro de las plantas, (2) estimulación sistemas antioxidantes en plantas, (3) complejación o coprecipitación de metales tóxicos con Si tanto en tejidos vegetales como en el suelo, (4) modulación de la expresión génica y la señalización a través de fitohormonas, aunque actualmente hay evidencia de una participación directa del Si en las funciones metabólicas de las plantas.

Uso de fitorreguladores en agricultura

Las hormonas vegetales son pequeñas moléculas que desempeñan funciones versátiles en la regulación del crecimiento, el desarrollo y las respuestas de las plantas al medio ambiente. Hasta la fecha, se ha confirmado que la auxina, giberelina, citoquinina, ácido abscísico, etileno, brasinoesteroides, ácido jasmónico, ácido salicílico y estrigolactonas funcionan como hormonas vegetales. Se ha considerado que las fitohormonas y los reguladores del crecimiento de las plantas (RCP) desempeñan un papel importante en la resistencia de las plantas al estrés ambiental, como la sequía, las temperaturas extremas, la salinidad y alcalinidad, el alojamiento, las inundaciones, etc., mediante la regulación del crecimiento y el proceso metabólico. Por lo tanto, la comprensión de los efectos y mecanismos de los RCP en la resistencia al estrés de los cultivos es de crucial importancia para mejorar la producción agrícola en el futuro cambiante del clima. Hoy en día, los productos fitoreguladores se utilizan manipular los procesos biológicos de los cultivos. Entre los procesos que se pueden manipular o modificar con el uso de fitorreguladores son: Inducción de floración, cuajado, amarre de frutos y crecimiento de frutos, aclareo de flores y frutos, enraizamiento, y producción forzada de cultivos. Sin embargo, a pesar de los múltiples beneficios que ofrecen los fitoreguladores de crecimiento, hay que tener en cuenta que la efectividad de su uso práctico está en función de tres aspectos: 1) la concentración del fitorregulador, 2) la sensibilidad del tejido u órgano de la planta y 3) la etapa fenológica del cultivo.

Por esta razón, es importante buscar asesoramiento profesional previo al uso de un fitoregulador, dado que la aplicación de dosis inadecuadas y en el momento incorrecto, puede desencadenar efectos negativos sobre el crecimiento y producción de las plantas.

Nutrición foliar complementaria

El papel de los nutrientes minerales aplicados a través de fertilizantes es innegable en la producción de cultivos de campo, ya que tienen funciones esenciales en el metabolismo de las plantas. Tanto los macros como los micronutrientes son importantes para el crecimiento, el desarrollo y la fisiología de las plantas y, en última instancia, importantes para mejorar la productividad y la calidad de las cosechas. La aplicación al suelo es el método más común para suministrar nutrientes esenciales a la planta. Sin embargo, la aplicación al suelo no siempre entrega los nutrientes de manera efectiva a la planta. El estado actual de la eficiencia en el uso de nutrientes es bastante bajo en el caso de N (30-50%), P (15-20%), S (812%) y micronutrientes (<2%) debido al deterioro químico, físico y biológico de la salud del suelo y las condiciones que restringen el crecimiento de las raíces para la absorción de nutrientes. Además, el problema de la deficiencia de micronutrientes se está agravando debido a la introducción de variedades de alto rendimiento, el aumento de la intensidad de los cultivos, el uso de fertilizantes con macronutrientes y el uso limitado de abonos orgánicos.

Las aplicaciones de fertilizantes al suelo se realizan principalmente sobre la base de pruebas de suelo, mientras que las aplicaciones foliares de nutrientes se realizan principalmente sobre la base de síntomas foliares visuales o pruebas de tejido vegetal. Por lo tanto, el diagnóstico correcto de la deficiencia de nutrientes es fundamental para una fertilización foliar exitosa. Un enfoque alternativo para superar el problema del suministro ineficaz de fertilizantes y nutrientes es la nutrición foliar suplementaria. Además, existen algunos requisitos más para una fertilización foliar exitosa. La fertilización foliar requiere un índice de área foliar más alto para absorber la solución de nutrientes aplicada en cantidad suficiente, puede ser necesario tener más de una aplicación dependiendo de la gravedad de la deficiencia de nutrientes. La concentración de nutrientes y la temperatura diurna deben ser óptimas para evitar que las hojas se quemem y la fuente de fertilizante debe ser soluble en agua para que sea más efectiva.

Aunque la aplicación de nutrientes al suelo no puede ser reemplazada por la aplicación foliar por completo, esta última definitivamente podría impulsar el crecimiento de la planta. Los objetivos de la nutrición foliar son estimular el proceso de producción de los cultivos para mejorar el rendimiento, corregir la deficiencia de nutrientes rápidamente durante las necesidades críticas, promover el crecimiento de los cultivos en condiciones de estrés abiótico, mejorar la eficiencia de uso de nutrientes y la calidad de las cosechas. La fertilización foliar de los cultivos puede complementar la fertilización del suelo. Si la fertilización foliar se mezcla con herbicidas, insecticidas o fungicidas de postemergencia, la probabilidad de respuesta del rendimiento podría aumentar y el costo de aplicación puede reducirse.

En la **figura 6**, se ilustra como el ciclo y balance de las principales hormonas en los cultivos, necesita de la participación de nutrientes claves para el funcionamiento de procesos fisiológicos mediados por hormonas. Lo anterior ilustra claramente que, a nivel práctico, la aplicación de fitoreguladores debe siempre ir acompañada de aplicaciones de nutrientes minerales para potenciar el efecto sobre los cultivos.

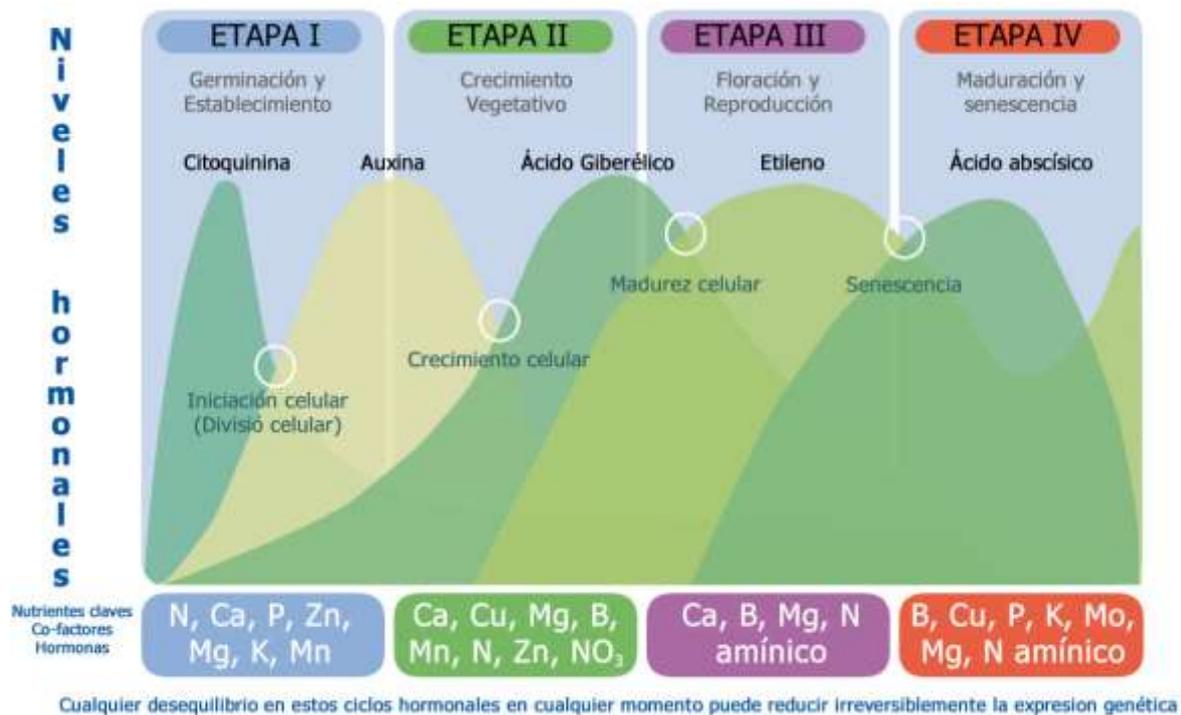


Figura 6. Ciclo y balance de las principales hormonas en las plantas.

Fuente: Stoller Internacional

Inducción de resistencia en plantas

Durante su vida, las plantas interactúan con numerosas plagas, que poseen diferentes modos de ataque y formas de vida. La respuesta inmune primaria evolucionó hacia el reconocimiento de los organismos que interactúan con la planta y la traducción, de tal reconocimiento, en respuestas de defensa dirigidas, específicamente, contra el organismo invasor. Además de esta inducción, las respuestas de defensa pueden ser cebadas. Este tipo de resistencia, a menudo, actúa de forma sistémica y es efectiva contra un amplio espectro de plagas. Existen diferentes tipos de Resistencia Inducida en dependencia del organismo o el inductor que interactúa con la planta. Las moléculas señalizadoras en plantas, los ácidos salicílicos (AS) y jasmónico (AJ) tienen una función importante en las rutas metabólicas de la resistencia inducida, con una posible interacción antagónica entre las vías de la resistencia sistémica adquirida (RSA) dependiente del AS y la vía de la resistencia sistémica inducida (RSI) dependiente del AJ. En general, las respuestas de defensa son vitales, pero también implican un costo para las plantas. Por lo

tanto, en lugar de mantenerlas constantemente, las respuestas de defensa pueden ser inducidas o cebadas y estar sujetas a una estrecha regulación, rápida activación y una concentración espacial y temporal, factores importantes para el éxito (Delgado, 2020). En la **figura 7**, se ilustra la respuesta y mecanismos de defensa en las plantas.

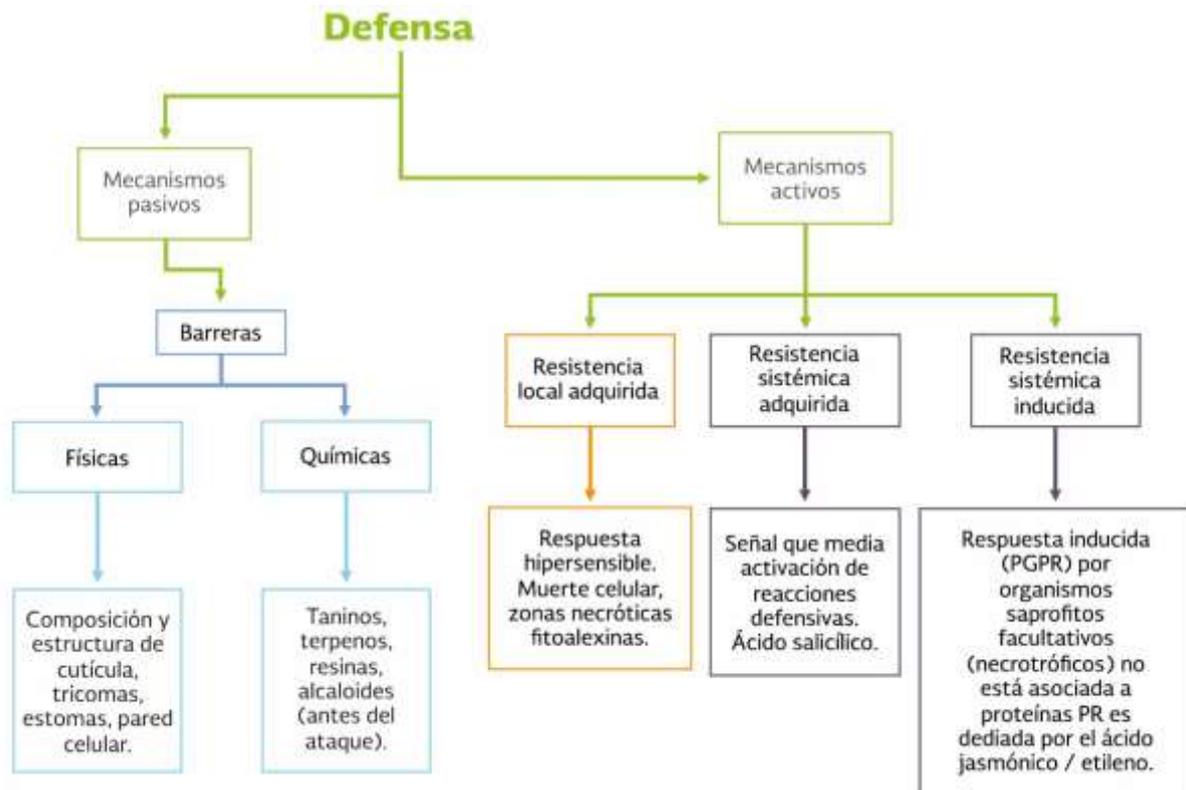


Figura 7. Respuesta y mecanismos de defensa de plantas ante situaciones bióticas y abióticas adversas. Fuente: Damián, G. 2017.

Importancia de la fenología en la aplicación de prácticas agronómicas

En agricultura, las observaciones fenológicas tienen una larga tradición ya que muchas decisiones de manejo y el momento de los trabajos de campo (plantación, fertilización, riego, protección de cultivos, cosecha, etc.) se basan en el desarrollo de las plantas. El conocimiento de la sincronización de los eventos fenológicos y su variabilidad puede proporcionar datos valiosos para la planificación, organización y ejecución oportuna de ciertas actividades agrícolas estándar y especiales (preventivas y protectoras) que requieren información avanzada sobre las fechas de las etapas específicas del desarrollo del cultivo. Los modelos matemáticos son las herramientas básicas para predecir el momento de los eventos fenológicos. La predicción precisa de las etapas de desarrollo de los cultivos juega un papel importante en el manejo de la producción de cultivos. Muchas acciones bioquímicas de las plantas cambian con su etapa de desarrollo, por lo tanto, fertilizar las plantas según las necesidades de las plantas puede aumentar la eficiencia del uso de fertilizantes y disminuir los desechos.

Referencias bibliográficas

1. Malhi, G.S.; Kaur, M.; Kaushik, P. 2021. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*, 13, 1318. doi.org/10.3390/su13031318.
2. Borrelli, P., Robinson, D., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *PNAS* 117, 36:21995. [doi/10.1073/pnas.2001403117](https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117).
3. Saulawa, B., Athlopheng, J., Darkoh, M., Mosetlhi, B. 2018. Impact and control of desertification in the drylands: A review article. *International Journal of Development and Sustainability* 7(10): 2423-2444.
4. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. Productivity and Efficiency Measurement in Agriculture. Literature Review and Gaps Analysis. Roma, Italia, 77 p.
5. Pradhan, P., Fischer, G., van Velthuisen, H., Reusser, D., Kropp, P. 2015. Closing Yield Gaps: How Sustainable Can We Be? *PLoS ONE* 10(6): e0129487. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>.
6. Edreira, J., Mourtzinis, S., Conley, S., Roth, A., Ciampitti, I., Licht, M., Kandel, H., Kyveryga, P., Lindsey, L., Mueller, D., Naeve, S., Nafziger, E., Specht, J., Stanley, J., Staton, M., Grassini, P. 2017. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. *Agricultural and Forest Meteorology* 247:170-180.
7. Troyo, E., Murillo, B., Rueda, E., Nieto, A., Valdez, R., Fraga, H., García, J. 2007. Métodos fisiotécnicos para estudiar especies hortícolas bajo agobio hídrico: Revisión conceptual y metodológica. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 13(2): 193-200.
8. Monteoliva, M., Bustos, D., Luna, C. 2019. Abordajes fisiológicos para el estudio del estrés abiótico en plantas: disertaciones y protocolos. Buenos Aires: Ediciones INTA, 2019. 87 p.
9. Pedroza, A. 2015. Genotecnica aplicada al estrés vegetal - Guía Didáctica. D.R. © Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. De México. C.P. 56230.
10. Villalobos, F., Fereres, E. 2017. Fitotecnica: principios de agronomía para una agricultura sostenible. Mundi-Prensa, Madrid, España. 628 p.
11. Zhao, Y.; Chen, Y.; Dai, H.; Cui, J.; Wang, L.; Sui, P. 2021. Effects of Organic Amendments on the Improvement of Soil Nutrients and Crop Yield in Sandy Soils during a 4-Year Field Experiment in Huang-Huai-Hai Plain, Northern China. *Agronomy* 2021, 11, 157. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010157>.
12. Yu, H.; Zou, W.; Chen, J.; Chen, H.; Yu, Z.; Huang, J.; Tang, H.; Wei, X.; Gao, B. 2019. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management* 232 (2019) 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.117>.

13. Sible, C.N., Seebauer, J.R., Below, F.E. 2021. Plant Biostimulants: A Categorical Review, Their Implications for Row Crop Production, and Relation to Soil Health Indicators. *Agronomy*, 11, 1297. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071297>.
14. Siedt, M.; Schäffer, A.; Smith, K.; Nabel, M.; Roß-Nickoll, M.; van Dongen, J. 2021. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of the Total Environment* 751 (2021) 141607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141607>.
15. Paetsch, L.; Mueller, C.; Kögel, I.; von Lützow, M.; Girardin, C.; Rumpel, C. 2018. Effect of in-situ aged and fresh biochar on soil hydraulic conditions and microbial C use under drought conditions. *Scientific Reports* 8:6852. doi:10.1038/s41598-018-25039-x.
16. Maltas, A.; Kebli, H.; Oberholzer, H.; Weisskopf, P.; Sinaj, D. 2018. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degrad Dev.* 2018;29:926–938. DOI: 10.1002/ldr.2913.
17. Baltazar, M., Correia, S., Guinan, K., Sujeeth, N., Bragança, R., Gonçalves, B. 2021. Recent Advances in the Molecular Effects of Biostimulants in Plants: An Overview. *Biomolecules*, 11, 1096. <https://doi.org/10.3390/biom11081096>.
18. Rouphael, Y., Colla, G. 2020. Editorial: Biostimulants in Agriculture. *Front. Plant Sci.* 11:40.doi: 10.3389/fpls.2020.00040.
19. Pylak, M., Oszust, K., Fraç, M. 2019. Review report on the role of bioproducts, biopreparations, biostimulants and microbial inoculants in organic production of fruit. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* volume 18, pages597–616.
20. Du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Hortic.* 196, 3–14. doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.021.
21. Khan, N., Bano, A., Babar, A. 2020. Impacts of plant growth promoters and plant growth regulators on rainfed agriculture. *PLoS ONE* 15(4): e0231426. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231426>.
22. Kumar, B. 2021. Plant Bio-regulators for Enhancing Grain Yield and Quality of Legumes: A Review. *Agricultural Reviews* (42):175-182.
23. Tadeu, J. 2019. Plant growth regulators in horticulture: practices and perspectives. *Biotechnologia Vegetal* Vol. 19(1): 3 – 14.
24. Ali, S., Baloch, A. 2020. Overview of Sustainable Plant Growth and Differentiation and the Role of Hormones in Controlling Growth and Development of Plants Under Various Stresses. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture* 11(2): 105-114.

25. Vanstraelen, M., Benková, E. 2012. Hormonal Interactions in the Regulation of Plant Development. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 28:463-487. doi.org/10.1146/annurev-cellbio-101011-155741.
26. Asami, T., Nakagawa, Y. 2018. Preface to the Special Issue: Brief review of plant hormones and their utilization in agriculture. *J Pestic Sci.*, 43(3): 154–158.
27. Tanou, G., Ziogas, V., Molassiotis, A. 2017. Foliar Nutrition, Biostimulants and Prime-Like Dynamics in Fruit Tree Physiology: New Insight on an Old Topic. *Front. Plant Sci.*8:75. doi: 10.3389/fpls.2017.00075.
28. Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., Yan, D. 2020. Effects of Foliar Fertilization: a Review of Status and Future Perspectives. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* volume 21, pages 104–118.
29. Zahed Z, Kumar SS, Mahale AG, Krishna JR, Mufti S. 2021. Foliar Micro nutrition of Vegetable Crops: A Critical Review, *J Hortic* 21:8.
30. Fernández, V., Sotiropoulos, T., Brown, P. 2015. Fertilización Foliar: Principios Científicos y Práctica de Campo. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA) Paris, Francia, 156 p.
31. Delgado, B. 2020. La resistencia inducida como alternativa para el manejo de plagas en las plantas de cultivo. *Revista de Protección Vegetal* 35(1):1-12.
32. Damián, G. 2017. Inducción de las Defensas en las Plantas a través de Elicitores. Diplomado Internacional de Bioestimulación de Cultivos Intensivos. Intagri. Gto. México.
33. Ruml, M., Vulić, T. 2005. Importance of phenological observations and predictions in agriculture. *Journal of Agricultural Sciences Belgrade* 50(2):217-225.
34. Ghera, C., Holt, J. 2006. Using phenology prediction in weed management: A review. *Weed Research* 35(6):461 – 470. doi:10.1111/j.1365-3180.1995.tb01643.x.
35. Ji, Z., Pan, Y., Zhu, X., Wang, J., Li, Q. 2021. Prediction of Crop Yield Using Phenological Information Extracted from Remote Sensing Vegetation Index. *Sensors* 21, 1406. <https://doi.org/10.3390/s21041406>.
36. Nord, E., Lynch, J. 2009. Plant phenology: a critical controller of soil resource acquisition. *Journal of Experimental Botany*, 60(7):1927–1937. doi.org/10.1093/jxb/erp018.