

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL CULTIVO DE MAÍZ A DOS GRUPOS DE BIOESTIMULANTES EN CONDICIONES DE ESTRÉS ABIÓTICO

Ludi Barzante, L.¹; Arévalo, E.^{1,2}; Cassaux A.³; Foti, M.N.¹ y Michel A.^{1,4}

1 Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER) - Oro Verde - Entre Ríos - Argentina - 2 Facultad de Ciencia y Tecnología (UADER) - Villaguay - Entre Ríos - Argentina - 3 Consultora externa - 4 CONICET

luciano.ludi@uner.edu.ar - edgardo.arevalo@uner.edu.ar

EVALUATION OF THE RESPONSE OF THE MAIZE CROP TO TWO GROUPS OF BIOSTIMULANTS UNDER ABIOTIC STRESS CONDITIONS

Biostimulants represent a promising strategy for mitigating the effects of abiotic stress in maize. The objective of this study was to evaluate the crop's response to a microbial biostimulant and another based on lignosulfonates and zinc nanoparticles under conditions predisposing to water and heat stress. Seventeen days after application, both groups showed increased net photosynthesis, stomatal conductance, and transpiration compared to the control. The microbial consortium achieved the highest water use efficiency, while the zinc treatments showed proportional increases in photosynthesis and transpiration. At 28 days, under greater stress intensity, the zinc treatments reduced stomatal conductance and transpiration, demonstrating a water conservation strategy, while the microbial consortium maintained higher photosynthesis and water use efficiency. In terms of biomass, zinc promoted an early response, while the microbial consortium expressed its benefits at later stages, due to the delay in establishing the symbiosis between the microorganisms and the plant. However, only the zinc treatments increased grain yield, likely by protecting reproductive processes during the critical yield-defining period. The late improvement in biomass from the bacterial consortium did not compensate for the lower number of ovules retained as grains. The timing of action and application of each biostimulant is crucial.

Palabras Clave: Bioestimulantes, Fotosíntesis, Transpiración, Sequía, Calor

Keywords: Biostimulants, Photosynthesis, Transpiration, Drought, Heat

Introducción

Los bioestimulantes constituyen insumos que incluyen microorganismos, ácidos húmicos y fúlvicos, proteínas hidrolizadas, entre otras sustancias (Du Jardin, 2015). La severidad y frecuencia de las sequías aumentarían en Argentina (Vera et al., 2023), lo cual pone foco en la necesidad de desarrollar tecnologías capaces de mitigar los efectos de las mismas. La aplicación de bioestimulantes en maíz ha demostrado resultados prometedores bajo déficit hídrico que afecta principalmente el crecimiento en las plantas y cuyos mecanismos para afrontarlo, se basan en ajuste osmótico, activación de sistemas antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos y la mejora de la eficiencia en el uso del agua (Tardieu et al., 2018). El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta del cultivo de maíz a dos grupos bioestimulantes: un biológico a base de microorganismos y otro no biológico a base de lignosulfonatos y nanopartículas de zinc, bajo condiciones predisponente para estrés abiótico.

Materiales y métodos

Sitio y productos bioestimulante

En parcelas cultivadas en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Entre Ríos, se realizó un ensayo en maíz (híbrido 7339 Viptera 3 - fecha de siembra: 19/12/24), en cuyo sitio se tomaron muestras para análisis de suelo profundidad 0-20 cm (Tabla 1), el cual pertenece a la serie Tezanos Pintos de tipo Argiudol ácuico. Se realizó una fertilización de 150 kg/ha de urea en el estadio V6, y se alcanzó una densidad lograda de 65.079 plantas por hectárea.

Los productos bioestimulantes se aplicaron vía foliar en el estado fenológico V5 el día 13/01/25. Por un lado se evaluó un compuesto de origen orgánico-mineral constituido por lignosulfonatos, un polímero obtenido del procesamiento de coníferas para la extracción de celulosa, bajo la forma de nanoencapsulados de zinc. Por otro lado se evaluó un compuesto que utiliza un consorcio microbiano, en los que se encuentra el género *Methylobacterium* como principal cepa.

Tabla 1. Análisis nutricional del suelo del lote del ensayo

Determinación	Resultado
pH en agua (1:2,5)	6,01
Carbono Orgánico	2,27%
Materia Orgánica	3,92%
Nitrógeno Total	0,21%
Nitratos (Harper)	99,9 ppm
Nitrógeno disponible	94,9 kg/ha
Fósforo disponible	91 ppm
Zinc	0,74 ppm

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron cuatro tratamientos: lignosulfonato a base de nanoencapsulados de zinc en dos dosis (100 ml/ha - NZ100 y 200 ml/ha - NZ200), y el consorcio microbiano (25 gr/ha - CM), en comparación con un control sin aplicar. El diseño experimental de ambos ensayos fue en bloques completos al azar con 4 repeticiones. Cada repetición estaba compuesta por una parcela de 10 metros de largo por 4 surcos de ancho.

Determinaciones no destructivas

Las mediciones de los parámetros de intercambio gaseoso en hoja (IRGA) se realizaron a los 17 y 28 días después de la aplicación de bioestimulantes (DDA), 30 de enero (V12) y 10 de febrero (VT-R1), respectivamente. Las mediciones se llevaron a cabo con un equipo portátil (LICOR 6400). Se tomaron de 5 a 6 lecturas en la última hoja completamente expandida de cada planta, en 3 plantas de los dos surcos centrales de cada parcela. Se midieron los parámetros de fotosíntesis neta (FN), conductancia estomática (CE), transpiración estomática (TE) y eficiencia en el uso del agua (EUA). Las mediciones se realizaron entre las 12 y 15 horas de cada día en forma alternada entre hojas de cada tratamiento en distintos puntos de intersección de 4 parcelas contiguas, para garantizar que las variables ambientales y de medición (temperatura de hoja, dióxido de carbono de referencia y luz externa) tengan una distribución lo más homogénea y acotada posible y no generen variabilidad indeseable en el set de datos de parámetros IRGA.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

Determinaciones destructivas

Se realizó un muestreo de biomasa acumulada aérea a los 15 y 56 DDA, coincidentes con los estados fenológicos V12 y R3, respectivamente. Para ello se cosecharon dos plantas por parcela, secadas en estufa de aire forzado a 60 °C hasta peso constante. La cosecha se realizó de forma manual a los 144 días desde siembra (dds) sobre los dos surcos centrales de cada parcela, y la separación de grano y marlo se llevó a cabo con una trilladora experimental LD Wintersteiger 180. Las muestras fueron limpiadas y se determinó la humedad con un humidímetro Delver HD 1021.

Condiciones ambientales

Se monitoreó el nivel de reservas hídricas de suelo a partir de los mapas de balance hídrico (BOLSACER, 2025). Mediante la estación climatológica del campo experimental (Pegasus, 2025) se registró temperatura máxima, evapotranspiración potencial y precipitaciones. A los 26 dds se muestreo a un metro de profundidad para determinar humedad gravimétrica actual (Hga) en el suelo del sitio del ensayo, a partir de la cual se estimó Hga en el lapso del 02/01 al 15/03 mediante el balance hídrico realizado con los datos de precipitación y evapotranspiración del cultivo (coeficiente del cultivo Kc obtenidos en Echarte y Otegui, 2023). Con el valor de Hga para cada día se determinó la disponibilidad de agua útil (DAU) de acuerdo a la metodología descrita en Gudelj et al., 2018. Los valores de las constantes hídricas de la serie Tezanos Pintos (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) se obtuvieron de Tóffoli et al, 2022, investigación realizada en el campo experimental de la FCA UNER.

Tratamiento de datos

El tratamiento de datos contempló, en primer lugar, un análisis estadístico descriptivo y luego como metodología de análisis general se utilizó un ANAVA. Ambos análisis elaborados mediante el software estadístico InfoStat.

Resultados y discusión

Variables ambientales

Se puede observar la ocurrencia de sequía (caída desde 60 a 15% de DAU) y temperaturas en torno a los 38°C en la primera mitad del período crítico (Fig. y Fig. 2). A medida que disminuye el agua disponible, aumenta la resistencia hidráulica al flujo de agua hacia las raíces, pudiendo alcanzarse un umbral a partir del cual la capacidad de suministro hídrico del suelo resulta insuficiente para satisfacer la demanda transpiratoria del maíz (Echarte y Otegui, 2023 y Koehler et al., 2023).

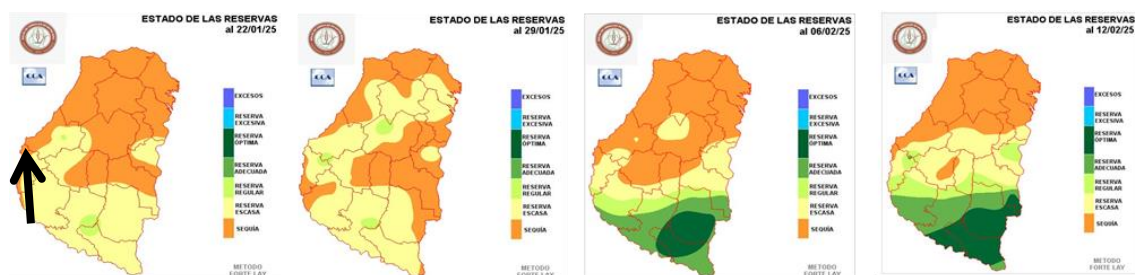


Figura 1. Evolución de las reservas hídricas de suelo (BOLSACER, 2025). La flecha negra indica el sitio del ensayo.

Parámetros de intercambio gaseoso

Los parámetros IRGA describen los flujos de CO₂ y vapor de agua entre la hoja y la atmósfera circundante caracterizando simultáneamente el funcionamiento del aparato fotosintético, el estado hídrico de los tejidos y la regulación estomática (Busch et al., 2024).

En las condiciones experimentales y ambientales llevadas a cabo en el ensayo, todos los parámetros IRGA respondieron a los factores en estudio (aplicación de bioestimulantes e intensidad de factores ambientales generadores de estrés hídrico y térmico).

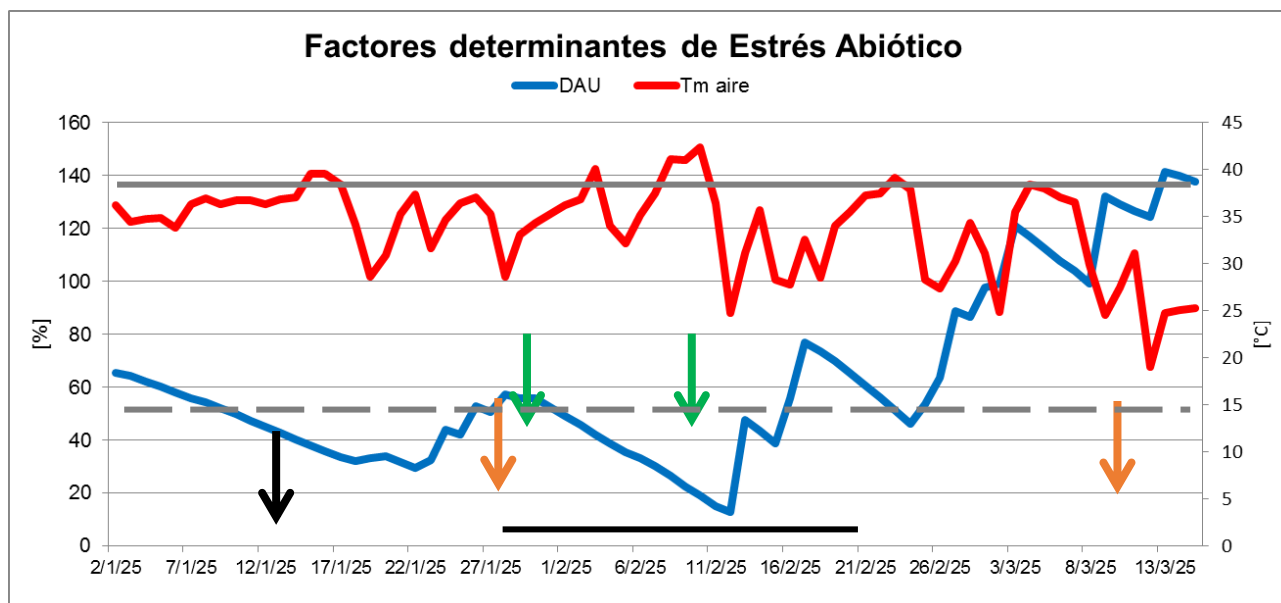


Figura 2. Evolución de los valores de disponibilidad de agua útil en suelo (DAU - %) y temperatura máxima de aire (Tm aire - °C) durante el lapso 2/1/25 - 15/3/25. Las flechas indican: los momentos de medición de parámetros IRGA (verde), determinación de biomasa aérea (anaranjada), aplicación de bioestimulantes (negro). Las líneas horizontales indican: nivel de 38°C (gris continua) a partir de la cual declina fuertemente la fotosíntesis en maíz (Andrade et al., 2023a), 50% de DAU (gris discontinua) y período crítico para la definición del rendimiento (negro) con una acumulación de tiempo térmico de 698,35 - 1108,88 °Cd, estimado con una temperatura base de 9.8 °C (Sadras et al., 2000 y Otegui, 2023).

Tabla 2. Valores medios y desvío estándar de parámetros de intercambio gaseoso en hoja: FN (Fotosíntesis Neta), CE (Conductancia Estomática), TE (Transpiración Estomática) y EUA (Eficiencia en el Uso del Agua) medidos en hojas testigo sin aplicación de bioestimulantes y con aplicación de bioestimulante lignosulfonato a base de nano zinc en dosis de 100 y 200 ml/ha (NZ100 y NZ200) y un consorcio microbiano (CM), a los 17 (n=252) y 28 (n=288) días después de la aplicación (DDA). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Temperatura de hoja: 40,46±0,87°C (17DDA) y 40,33±1,03°C (28DDA). Dióxido de carbono de referencia: 400,41±2,75ppm (17DDA) y 400,04±2,76ppm (28DDA).

Tratamientos	FN [UmolCO ₂ /ms/seg]	CE [molH ₂ O/m ² /seg]	TE [mmolH ₂ O/m ² /seg]	EUA [UmolCO ₂ /mmolH ₂ O]
17 DDA				
Testigo	20,58 ± 2,71 A	0,055 ± 0,0086 A	2,49 ± 0,27 A	8,26 ± 0,48 A
NZ100	22,88 ± 4,14 B	0,0647 ± 0,0021 B	2,79 ± 0,09 B	8,19 ± 1,46 A
NZ200	22,41 ± 2,23 B	0,0617 ± 0,0023 B	2,8 ± 0,09 B	8,03 ± 0,91 A
CM	26,17 ± 3,51 C	0,0619 ± 0,0064 B	2,52 ± 0,18 A	10,41 ± 1,4 B
28 DDA				
Testigo	26,89 ± 3,56 B	0,0711 ± 0,0044 D	2,88 ± 0,24 B	9,34 ± 1,16 A
NZ100	19,64 ± 1,06 A	0,0479 ± 0,0016 B	1,86 ± 0,06 A	10,56 ± 0,63 B
NZ200	20,44 ± 2,21 A	0,0451 ± 0,01 A	1,86 ± 0,14 A	11 ± 0,57 BC
CM	32,8 ± 5,6 C	0,0648 ± 0,0034 C	2,89 ± 0,12 B	11,38 ± 2,11 C

A los 17 DDA todos los tratamientos con bioestimulantes mostraron un incremento en FN, CE y TE respecto al testigo (Tabla 2). La respuesta diferencial más relevante fue la del tratamiento CM en términos de EUA respecto al testigo (+26% - Tabla 2) explicado fundamentalmente por una FN un 27% superior, lo cual podría estar en consonancia con una coordinación en la regulación estomática, los cambios en la arquitectura radicular y la expresión de genes involucrados en la respuesta al estrés a partir del ajuste de rutas hormonales clave, como el ácido abscísico, el etileno, las auxinas y las citoquininas (Poorniammal et al., 2026), incrementando la síntesis de prolina en hoja, lo cual optimiza la conductancia del mesófilo al CO₂ sin requerir una apertura estomática exacerbada (Kumar et al. (2021). Por su parte, NZ100 y NZ200 mostraron incrementos similares y proporcionales en FN y TE (+11%), resultando en una EUA apenas un 2% inferior al testigo (Tabla 2), comportamiento consistente con el rol del Zinc como cofactor en la actividad de enzimas fotosintéticas y en la síntesis de clorofila, reduciendo los efectos del estrés al estimular la actividad fotosintética (Kathirvelan et al., 2025).

Las condiciones ambientales observadas a los 28 DDA (Fig. 1 y 2) determinaron una mayor intensidad de factores generadores de estrés abiótico. Los dos grupos de bioestimulantes mostraron estrategias de respuesta diferentes. Los tratamientos con zinc mostraron una caída marcada en CE (-34%) respecto al testigo, con la consecuente reducción de FN y TE, con una EUA un 15% superior (Tabla 2), lo cual indica que la planta priorizó la conservación del agua demostrando que este elemento induce la acumulación de ácido abscísico foliar, regula los canales iónicos en las células oclusivas, promoviendo un cierre estomático preventivo (Kanna et al., 2024). El tratamiento CM sostuvo la FN un 22% por encima del testigo, sin diferencias significativas en TE, y alcanzó una EUA un 22% superior (Tabla 2). Estas bacterias degradan el precursor del etileno, cuya acumulación promueve el cierre estomático y estimulan la síntesis de citoquininas que contrarrestan al ácido abscísico en su función de cierre de estomas (Chenche-López y Chenche-López 2026), promueven la síntesis de osmoprotectores contribuyendo al ajuste osmótico celular para mantener la turgencia de las células oclusivas (Ehinmitan et al., 2025a).

Biomasa y rendimiento

El crecimiento es el incremento en peso seco, volumen, longitud o área, producto de la división y alargamiento celular de los órganos diferenciados. Estos procesos son el resultado de la producción, transporte y acumulación de fotoasimilados y nutrientes (Carcova et al., 2010). El rendimiento, en el caso del maíz, puede ser analizado en términos de sus componentes numéricos (número de granos por unidad de superficie y el peso individual del grano) y de las relaciones de estos componentes con el crecimiento del cultivo y la partición de biomasa a lo largo del ciclo (Andrade et al., 2023b).

Este cultivo de maíz estuvo expuesto a condiciones predisponentes de estrés abiótico durante la primera mitad del periodo crítico de definición del número final de granos por planta (Fig. 1 y 2). Diversos estudios coinciden en señalar que este intervalo es de gran sensibilidad en el maíz, dada su relevancia para la determinación del número final de granos por planta, durante un período de aproximadamente 30 días

centrado en inicio de floración femenina o silking (Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018 y Silva et al., 2022).

La primera determinación de biomasa aérea a los 15 días DDA (Tabla 3) mostró una respuesta diferencial coherente con los mecanismos de acción de cada bioestimulante en esas condiciones específicas. Los tratamientos NZ100 y NZ200 acumularon una biomasa en torno al 24% superior al testigo, mientras que CM mostró una reducción del 10% respecto al mismo. La ventaja inicial de los tratamientos con zinc puede explicarse por su intervención en procesos relacionados con la síntesis de clorofila, la actividad de la Rubisco y el metabolismo de carbohidratos (Nayak et al., 2025), particularmente mediante formulaciones nanoestructuradas, mejorando la integridad de las membranas celulares y favoreciendo la expansión foliar (Din et al., 2026). La disminución de biomasa de CM (-10%) podría estar asociado a que la planta requiere tiempo para generar la simbiosis funcional y expresar los mecanismos que favorecen al metabolismo, los cuales no operan de manera inmediata post-aplicación, debido a que el microorganismo compite transitoriamente con la planta hospedante por recursos y metabolitos intermedios, lo que puede ralentizar momentáneamente la acumulación de biomasa aérea (Ehinmitan, et al., 2025a y Lephatsi et al., 2022).

Tabla 3. Valores medios y desvío estándar de biomasa aérea determinada a los 15 y 56 días después de la aplicación de bioestimulantes (DDA) y rendimiento, en tratamientos con aplicación de lignosulfonato a base de nano zinc en dosis de 100 y 200 ml/ha (NZ100 y NZ200) y un consorcio microbiano (CM) en relación a un testigo sin aplicar. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). $n=4$.

Tratamiento	Biomasa aérea 15 DDA (V12)	Biomasa aérea 56 DDA (R3)	Rendimiento en grano
	Kg/Ha		
Testigo	1845,55 ± 266,84 AB	16901,64 ± 4484,4 A	9798,24 ± 1037,88 A
NZ100	2273,25 ± 255,84 B	18348,3 ± 2192,71 A	10647,7 ± 519,51 A
NZ200	2289 ± 645,32 B	20572,02 ± 3190,24 A	10444,8 ± 714,96 A
CM	1667,7 ± 455,24 A	20763,18 ± 5130,47 A	9613,52 ± 878,71 A

Respecto a la segunda determinación de biomasa aérea a los 56 DDA (R3 - Tabla 3), todos los tratamientos bioestimulados superaron al testigo. Particularmente CM alcanzó el mayor incremento de biomasa (23 %), seguido por NZ200 (22 %). Estos resultados sugieren que una vez establecida la interacción planta-microorganismo, los mecanismos permitieron sostener el crecimiento aún bajo condiciones predisponentes de estrés abiótico (Fig. 1 y 2) mediante la producción de ácido indolacético, giberelinas, exopolisacáridos y enzimas antioxidantes, favoreciendo el desarrollo radical, la absorción de agua y la protección del aparato fotosintético durante períodos de sequía (Ehinmitan et al., 2025b). Las nanopartículas poseen propiedades antioxidantes que pueden aliviar el estrés oxidativo inducido por la sequía mediante la eliminación de especies reactivas del oxígeno (Kanna et al., 2024).

El comportamiento observado sobre biomasa no se tradujo completamente en rendimiento en grano en el tratamiento CM a pesar de presentar la mayor biomasa final, registrando un rendimiento ligeramente inferior al testigo, mientras que las dosis baja y alta de zinc incrementaron la producción de granos entre un 9 y un 7 % respectivamente (Tabla 3). El número de granos por unidad de área queda comprometido de manera irreversible durante la primera mitad del período crítico



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

cuando el estrés coincide con la etapa de desarrollo de los óvulos y la sincronización antesis-*silking*. El tratamiento CM mostró una reducción de biomasa durante el inicio del período crítico, lo que implica un menor número de óvulos retenidos como granos, lo cual, evidentemente no pudo ser compensada por la mayor biomasa acumulada durante el período de llenado (R3 - Tabla 3), ya que el número de destinos ya estaba fijado (Silva et al., 2022). El mayor rendimiento con NZ100 y NZ200 (Tabla 3) podría asociarse con el hecho de que el zinc participa en la integridad del aparato reproductivo y el funcionamiento de numerosas enzimas antioxidantes que limitan el daño oxidativo inducido por altas temperaturas durante la floración (Saleem et al., 2022), mejorando también la fertilidad del polen (Din et al., 2026). Cabe destacar también que el nivel de este elemento, de acuerdo al análisis nutricional del lote del ensayo (Tabla 1) se encontraba por debajo del nivel crítico de 1,1ppm (Barbieri et al., 2017), por lo que esta mayor respuesta en términos de rendimiento a las dosis de zinc podría haber estado vinculada a esta deficiencia del micronutriente en el suelo.

Conclusión

Los tratamientos con zinc nanoencapsulado y lignosulfonato promovieron una respuesta temprana en biomasa y rendimiento, asociada a una estrategia de conservación del agua y protección de los procesos reproductivos durante el período crítico. En contraste, el consorcio microbiano manifestó una respuesta más tardía, favoreciendo el crecimiento vegetativo sin compensar la disminución de los destinos reproductivos. Se sugiere que este último grupo de bioestimulantes se apliquen con mayor anticipación al inicio del período crítico de definición del rendimiento para contemplar el tiempo requerido hasta lograr la simbiosis funcional con la planta.

Referencias bibliográficas

1. Andrade, F.; Neiff, N.; Andrade J. (2023a). Crecimiento del cultivo. En F. H. Andrade (Ed.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 74 - 106). Fernando Héctor Andrade.
2. Andrade, F.; Vega, C.; Cirilo, A.; Otegui, M.E. (2023b). Determinación del número de granos (pp 108-129). En F. H. Andrade (Ed.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz*. Fernando Héctor Andrade.
3. Barbieri, P. A., Sainz Rozas, H. R., Wyngaard, N., Eyherabide, M.,...et al. (2017). Can Edaphic Variables Improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn? *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 556–563.
4. Bolsa de Cereales de Entre Ríos. (Enero - Febrero 2025). Informe semanales.
5. Borrás, L., & Vitantonio-Mazzini, L. N. (2018). Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments. *Journal of Experimental Botany*, 69(13), 3235-3243.
6. Busch, F. A., et al. (2024). A guide to photosynthetic gas exchange measurements: fundamental principles, best practice and potential pitfalls. *Plant, Cell & Environment*, 47(8), 2844–2862.
7. Cárcova, J.; Abeledo, G. y López Pereira, M. (2010). Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes (p. 73 - 98) En: *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Satorre E.H. Bs. As. Editorial Facultad de Agronomía UBA, 816p.
8. Chenche-López OM and Chenche-López CM (2026) PGPR-AMF consortia improve drought tolerance in maize through stomatal regulation, antioxidant defense, and yield stability. *Front. Plant Sci.* 17:1802481.
9. Din, K.U., Naeem, M.S., Ahmad, F., Hussain, S., 2026. Green synthesized zinc oxide nanoparticles enhance maize tolerance against drought stress by improving plant water balance, antioxidant defense, and osmotic adjustment. *Plant. Nano Biol.* 16, 100275.
10. Du Jardin P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia horticulturae*, 196, 3-14.
11. Echarte, L. y Otegui, M.E. (2023). Consumo y eficiencia en el uso del agua. En F. H. Andrade (Ed.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 221 - 245). Fernando Héctor Andrade.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

12. Ehinmitan, E., Siamalube...et al (2025a). Methylobacterium spp. in sustainable agriculture: strategies for plant stress management and growth promotion. *The Microbe*, 100476.
13. Ehinmitan, E., Siamalube, B....et al (2025b). Methylobacterium spp. Isolated From Semiarid Soils Promote Growth and Drought Tolerance in Maize in Kenya. *International journal of microbiology*, 2025, 7442350.
14. Gudelj, O.; Arce, J. y Gudelj, V. (2018). Metodología de Muestreo y Determinación de Agua en el Suelo. Información para Extensión en Línea N° 29. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. Argentina. p.18.
15. Kanna, V. K., Djanaguiraman, M....et al (2024). Improvement of maize drought tolerance by foliar application of zinc selenide quantum dots. *Frontiers in plant science*, 15, 1478654.
16. Kathirvelan, P., et al. (2025). Response of maize (*Zea mays* L.) to foliar-applied nanoparticles of zinc oxide and manganese oxide under drought stress. *Plants*, 14(5), 732.
17. Koehler, T., Wankmüller, F. J., Sadok, W., & Carminati, A. (2023). Transpiration response to soil drying versus increasing vapor pressure deficit in crops: physical and physiological mechanisms and key plant traits. *Journal of Experimental Botany*, 74(16), 4789-4807.
18. Kumar, M., Patel, P. y Tomar, R. S. (2021). Methylobacterium as a promising plant growth-promoting biostimulant for mitigating drought stress in maize. *Journal of Applied Microbiology*, 131(4), 1892-1906.
19. Lephatsi, M., Nephali, L., Meyer, V., Piater, L. A., ...et al. (2022). Molecular mechanisms associated with microbial biostimulant-mediated growth enhancement, priming and drought stress tolerance in maize plants. *Scientific reports*, 12(1), 10450.
20. Nayak P, Jayadeva H M, Sannagoudar ...et al. (2025). Biogenic zinc nanoparticles from weeds as an innovative zinc source for boosting growth, yield, and profitability in maize. *Front. Sustain. Food Syst.* 9:1613410.
21. Otegui, M.E. (2023). Desarrollo del cultivo. En F. H. Andrade (Ed.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 51 - 72). Fernando Héctor Andrade.
22. Pegasus, plataforma y estación meteorológica (Enero - Febrero 2025).
23. Poorniammal, R., Prabhu, S., Dufossé, L., & Sharmi, K. R. (2026). Methylobacterium-Mediated Phytohormone Regulation and Metabolic Priming in Plant Drought Resilience. *Agronomy*, 16(5), 494.
24. Sadras, V.O.; Ferreiro, M.; Glutheim, F.; y Kantolic, A.G. (2000). Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo (pp 29 - 60). En F.H. Andrade y V.O. Sadras (Ed.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*.
25. Saleem, M. H., et al. (2022). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1033092.
26. Silva, P. C., et al. (2022). Grain yield, anthesis-silking interval, and phenotypic plasticity in response to changing environments: Evaluation in temperate maize hybrids. *Field Crops Research*, 285, 108583.
27. Tardieu, F.; Simonneau, T y Muller, B. (2018). The Physiological Basis of Drought Tolerance in Crop Plants: A Scenario-Dependent Probabilistic Approach. *Annu Rev Plant Biol.* 69:733-59.
28. Tóffoli, M.B.; Hernández, J.P.; Kindernech, L.E.; Befani, R. y Bressan, P. (2022). Caracterización edáfica y topográfica para la determinación de ambientes en función del agua disponible. *RCA* 25 (2): 30-40.
29. Vera, C., Skansi, M., y González, M. (2023). Características de las sequías en el sur de Sudamérica. *Sistema de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica*.