

Tolerancia a la salinidad del suelo en especies de interés agronómico.

Importancia de su estudio en el contexto de cambio climático.

Julia Lúquez, Gustavo Eyherabide y Lucas R. Petigrosso

Resumen

La salinidad del suelo es uno de los principales factores que limitan el crecimiento y la productividad de los cultivos. La superficie mundial afectada es enorme, mil megahectáreas (Mha), es decir, cuatro veces el tamaño de Argentina; se incrementa a razón de 2 a 5 Mha por año y este aumento está profundamente condicionado por el cambio climático.

La salinidad de los suelos es causada principalmente por el cloruro de sodio, pero también por otras sales con diferentes iones; sulfato, carbonato, bicarbonato, magnesio, calcio y potasio pueden ocasionar este problema. Los suelos salinos provocan efectos perjudiciales en las plantas y limitan el crecimiento de microorganismos benéficos y simbióticos. La salinidad afecta el desarrollo vegetal en todas sus etapas, desde la germinación y el crecimiento vegetativo, incluyendo la madurez reproductiva. Sin embargo, no todas las variedades de una especie presentan los mismos efectos, algunas alcanzan cierta tolerancia a la salinidad debida a diferentes mecanismos.

La evaluación de la tolerancia a la salinidad de especies agrícolas es un área de trabajo dinámica que tiende a expandir las fronteras de cultivo y sostener la producción de alimentos. En este artículo se mencionan aspectos importantes relacionados con los efectos de la salinidad sobre las plantas y se presentan los aportes acerca del tema.

La salinidad es uno de los principales factores que limitan el crecimiento de las plantas y la productividad de sus cultivos (Parida y Das, 2004). Por lo tanto, ocasiona serios inconvenientes en muchas regiones del mundo, principalmente en aquellas donde el riego es esencial. Se estima que la quinta parte de la superficie del planeta y la mitad de las tierras irrigadas presentan problemas de salinidad (Wang et al, 2012). En cifras, significan mil Mha afectadas, con una tasa anual de expansión de 2-5 Mha por año (Taleisnik, 2021). El aumento de la superficie con problemas de salinidad se debe a diversas causas, muchas de las cuales se modifican, a su vez, en el contexto de cambio climático que está transitando nuestro planeta. El incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera está ligado a un aumento de la temperatura global, de un grado centígrado en los últimos 140 años. Debido a que las emisiones de estos gases no se han reducido sino que, por el contrario, se incrementaron, las proyecciones indican que el aumento de la temperatura global será de entre 1 y 3,7 °C en los próximos 80 años.

El cambio climático impacta en todos los sistemas agropecuarios, tanto agrícolas como ganaderos. El aumento de la temperatura, el estrés ocasionado en los cultivos, la variación en los patrones de lluvia, el aumento de los eventos extremos, el incremento de las concentraciones de ozono, las deficiencias de nutrientes y la concentración de metales pesados asociados, están causando una reducción en la productividad agropecuaria. Por otra parte, el incremento del nivel del mar, consecuencia del aumento de la temperatura global, provoca la pérdida de tierras cultivables, la intrusión marina en acuíferos y el aumento de las sales en los suelos. Son previsibles, en este contexto, el desarrollo y la aparición de plagas y enfermedades de los cultivos. Diferentes modelos prospectivos señalan que, por cada grado de incremento de temperatura a nivel global, la reducción de la productividad agrícola disminuiría entre 6 y 10%, dependiendo del escenario en cada caso.

Las sales y los suelos

Las sales más comunes presentes en los suelos están formadas por combinaciones de los cationes (iones positivos) sodio, calcio, magnesio y potasio con los aniones (iones negativos) sulfatos, carbonatos y cloruros (FAOSTAT, 2018).

La cantidad de iones de un suelo, indicador de su salinidad, puede estimarse midiendo su conductividad eléctrica (CE, unidad: deciSiemens/metro, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Valores de CE menores a $2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ son típicos de condiciones no salinas, mientras que valores de $2\text{--}4\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se consideran ligeramente salinos y tienen poco efecto sobre las plantas, excepto en algunos cultivos sensibles. A medida que los valores van aumentando, si se ubican en un rango de entre $4\text{--}8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y $8\text{--}16\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, los suelos son considerados moderadamente y severamente salinos, respectivamente. Cuando se encuentran valores de CE mayores a $16\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, se considera que el suelo es muy severamente salino y sólo algunas pocas especies pueden crecer en esas condiciones (Bahizire, 2007).

El cloruro de sodio es la sal más importante que causa salinidad en los suelos, pero también sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, magnesio, calcio y potasio son otras posibles fuentes que ocasionan este problema (Bresler, 1982). De acuerdo con el tipo de sal que predomina, los suelos se clasifican en salinos, sódicos y salino-sódicos.

Los suelos sódicos tienen altos valores de pH (mayores a 8,5) y una pobre estructura. La dispersión de las arcillas dificulta la infiltración del agua, la penetración de las raíces y la respiración de las mismas. Estos suelos son pegajosos cuando están mojados y duros cuando están secos. Por último, los suelos salino-sódicos tienen valores altos de CE (International Rice Research Institute, 2013).

Los suelos salinos tienen efectos no sólo sobre las plantas, como toxicidad por iones, estrés osmótico, deficiencia de nutrientes

(nitrógeno, calcio, potasio, fósforo, hierro, zinc, etc.) y estrés oxidativo, sino que también limitan el crecimiento de microorganismos benéficos y simbióticos (Chinnusamy y Kang Zhu, 2006).

Los problemas de salinidad son más pronunciados en regiones áridas y semiáridas (Bresler, 1982). Éstas se caracterizan por presentar suelos y aguas salinas, sequía y/o altas temperaturas. Agravan estos problemas la alta demanda de agua de las plantas, que fomenta la acumulación de sales en las raíces y las precipitaciones insuficientes para eliminar por lavado los iones que componen las sales.

Los suelos de Argentina se están salinizando. Según la FAO-UNESCO, somos el tercer país con mayor superficie de suelos afectados en el mundo, después de Rusia y Australia (Lavado, 2008). Las causas de esta situación son varias, pudiendo citarse el ascenso de las napas freáticas, el incremento del riego y de la salinización del agua utilizada (Omami, 2005). En lugares específicos, inciden también la cercanía del mar, el desmonte –en Chaco–, el riego por goteo –en Mendoza– y la natural salinidad de los suelos –en Santiago del Estero y Tucumán.

El efecto de la salinidad en las plantas

Las plantas responden de manera muy variada ante el aumento de la salinidad de los suelos. Las respuestas son distintas dependiendo de las especies y aun dentro de ellas (Tal, 1985). Debido a esto es que se hace necesario realizar ensayos para evaluar la tolerancia a la salinidad de distintos materiales genéticos de una misma especie, en el marco de programas de mejoramiento.

La disminución del crecimiento en las plantas bajo condiciones salinas varía con la concentración y composición de la sal, el tipo de especie y el estadio fenológico (momento del desarrollo) en que se encuentre (Sharma, 1983). En este sentido, la tolerancia en un

estado puede ser independiente de la tolerancia en otro estado. Normalmente, los ensayos de germinación se realizan en estufas de crecimiento; los de plantas jóvenes, en macetas en invernáculos, en condiciones controladas de nutrición.

La salinidad afecta casi todas las etapas del desarrollo de las plantas, la germinación, el crecimiento vegetativo, la madurez reproductiva (Fowler, 1991). De todas las formas de estrés abiótico a las que las plantas se encuentran expuestas, como bajas temperaturas, salinidad, sequía, inundaciones, calor, estrés oxidativo y toxicidad por metales pesados durante todo el ciclo de vida, el salino es el estrés más típico (Turan et al, 2012). Está directamente relacionado con el equilibrio osmótico (Morales et al, 2006), pudiendo provocar estrés hídrico, debido a una mayor presión osmótica en la zona radicular (Gorham et al, 1985). Las consecuencias finales para la planta son: reducción en la tasa de crecimiento y cambios en procesos metabólicos por la interrupción de la nutrición mineral y por la toxicidad de la sal (Rani et al, 2012).

Las plantas pueden desarrollar dos conductas adaptativas cuando se encuentran en una situación de estrés, dependiendo de la intensidad de la causa, la tolerancia o la evasión. El mecanismo de tolerancia permite mantener una alta actividad metabólica bajo estrés no muy severo y, si es más pronunciado mantiene una actividad reducida. En tanto, el mecanismo de evasión reduce al mínimo la actividad metabólica y mantiene durmiente la planta ante condiciones extremas de estrés (Osmond et al, 1987).

Trabajos realizados en diferentes lugares del mundo, mencionados por Maas y Hoffman (1977), permitieron clasificar las especies en tres categorías de acuerdo a su respuesta a la salinidad: tolerantes, moderadamente tolerantes o no tolerantes (Tabla 1). Los trabajos de mejoramiento genético en todas las especies permiten que periódicamente aparezcan en el mercado nuevos cultivos. Por lo tanto, es necesario revisar y desafiar los nuevos genotipos en condiciones de salinidad crecientes debido al contexto climático presente.

Tabla 1. Efecto de la salinidad del suelo sobre el crecimiento de los cultivos

Conductividad eléctrica (dS.m ⁻¹)	Grado de salinidad	Riesgo para el crecimiento del cultivo	Rendimiento del cultivo	Cultivos con tolerancia relativa *
0-2	No salino	Muy bajo	Sin restricciones	
2-4	Levemente salino	Bajo	restringido en cultivos sensibles	Frijol, guisante, maíz, soja, girasol, trébol
4-8	Moderadamente salino	Medio	Restringido en la mayoría de los cultivos	Canola, lino, avena, trigo, centeno, cebada, alfalfa, trébol dulce
8-16	Severamente salino	Alto	Pocos cultivos tolerantes producen satisfactoriamente	Algunas especies de <i>Agropyrum</i> ("wheat-grass"), gramíneas nativas de la estepa rusa y de China.
>16	Muy severamente salino	Muy alto	Solo unas pocas gramíneas forrajeras tolerantes crecen satisfactoriamente	

*para cada rango de salinidad se indican aquellos cultivos que rinden al menos un 50 % de lo esperable en condiciones no salinas.



Con vistas a mejorar la tolerancia a la salinidad de los cultivos, se tienen en cuenta ciertas características fisiológicas como criterios de selección. Así, se estudian en condiciones de alta salinidad, el potencial agua y la relación K^+/Na^+ en los tejidos, la succulencia, la eficiencia en el uso del agua, la fluorescencia y los contenidos de clorofila, prolina, fenoles y azúcares, así como la cantidad y actividad de compuestos antioxidantes, tanto enzimáticos como no enzimáticos (Ashraf y Foolad, 2013).

Por otro lado, las siguientes variables agronómicas son valiosas para evaluar el comportamiento de los cultivos en condiciones salinas: tiempo y tasa de emergencia, sobrevivencia, emergencia final, altura de planta, biomasa y rendimiento de grano (Steppuhn et al, 2001).

Nuestros aportes

En 2009, nuestro grupo comenzó a investigar la tolerancia a la salinidad de especies de interés agronómico. En ese momento, estaban en evaluación materiales genéticos de trigo a los que se les había introducido genes de girasol que le conferían tolerancia al estrés hídrico. Ambos estreses tienen una fuerte relación debido al estado de los suelos en Argentina.

Se comenzó evaluando la tolerancia a la salinidad de diferentes cultivares de soja. Se realizaron ensayos de germinación y en plantas jóvenes, donde se comprobó la condición de exclusor de iones cloruro de algunos cultivares para tolerar así la salinidad (Lúquez et al, 2015).

También se evaluaron materiales de kiwi, comprobándose una gran sensibilidad al cloruro de sodio. Se continuó con evaluaciones en canola y cebada, especies que se consideraban como posibles reemplazos del trigo. En ambas se comprobó

que la acumulación de prolina en la parte aérea de las plantas era responsable de la tolerancia a la salinidad (Di Paolo et al, 2019). También se han realizado evaluaciones de tolerancia a salinidad en gramíneas forrajeras de importancia, tales como festuca alta y raigrás anual, y en una especie emparentada con la canola, la mostaza de Etiopía (*Brassica carinata* L.).



Figura 1. Plantas jóvenes de festuca alta sometidas a distintas concentraciones de cloruro de sodio. Se puede observar, de izquierda a derecha, el efecto del estrés salino.

La festuca alta es una de las gramíneas perennes más utilizadas en regiones templadas de Argentina y Uruguay. Al igual que otras gramíneas, puede establecer una relación simbiótica con hongos endófitos. Esta convivencia favorece el crecimiento y la tolerancia a estreses bióticos y abióticos, a través de la producción de alcaloides (Omacini et al, 2013). Sin embargo, algunos

de estos alcaloides son tóxicos para el ganado en pastoreo causando diversos síndromes (festucosis) que provocan importantes pérdidas económicas en la producción ganadera. Una estrategia para disminuir la toxicidad es usar cultivares inoculados con hongos endófitos seguros o amigables, que no producen reacción en el ganado.

Se halló que la asociación de festuca alta con un hongo endófito tanto silvestre como seguro no conferiría tolerancia a la salinidad tanto sobre una variedad silvestre como en un cultivar comercial. No se registraron ventajas en variables relacionadas con la germinación (Soto et al, 2021). Por esta razón, actualmente se está evaluando a) si estos materiales genéticos de festuca alta presentarían variabilidad para la tolerancia en concentraciones mayores de NaCl en el estado de germinación y b) cómo afectaría la salinidad a plantas jóvenes de festuca alta infectadas y libres de endófitos silvestres y seguros (Figura 1).

Por su parte, el raigrás anual es una especie de alta calidad forrajera, ampliamente difundida en regiones templadas con ambientes de buena humedad y fertilidad. En Argentina es una de las especies de mayor difusión en sistemas de producción de leche y carne. Sin embargo, su persistencia como forraje es pobre bajo condiciones de estrés abiótico. Los primeros cultivares comerciales de raigrás anual difundidos en el mercado son diploides. Es decir, la cantidad de cromosomas (material genético) presente en cada una de sus células es el doble del complemento básico. Actualmente, existen cultivares tetraploides, con el doble de cromosomas –4 veces el complemento básico–, seleccionados para sistemas de producción animal con alta intensificación.

Al igual que la festuca alta, el raigrás anual establece asociaciones con hongos endófitos. En su caso, se halló que materiales diploides infectados se beneficiaron con la presencia

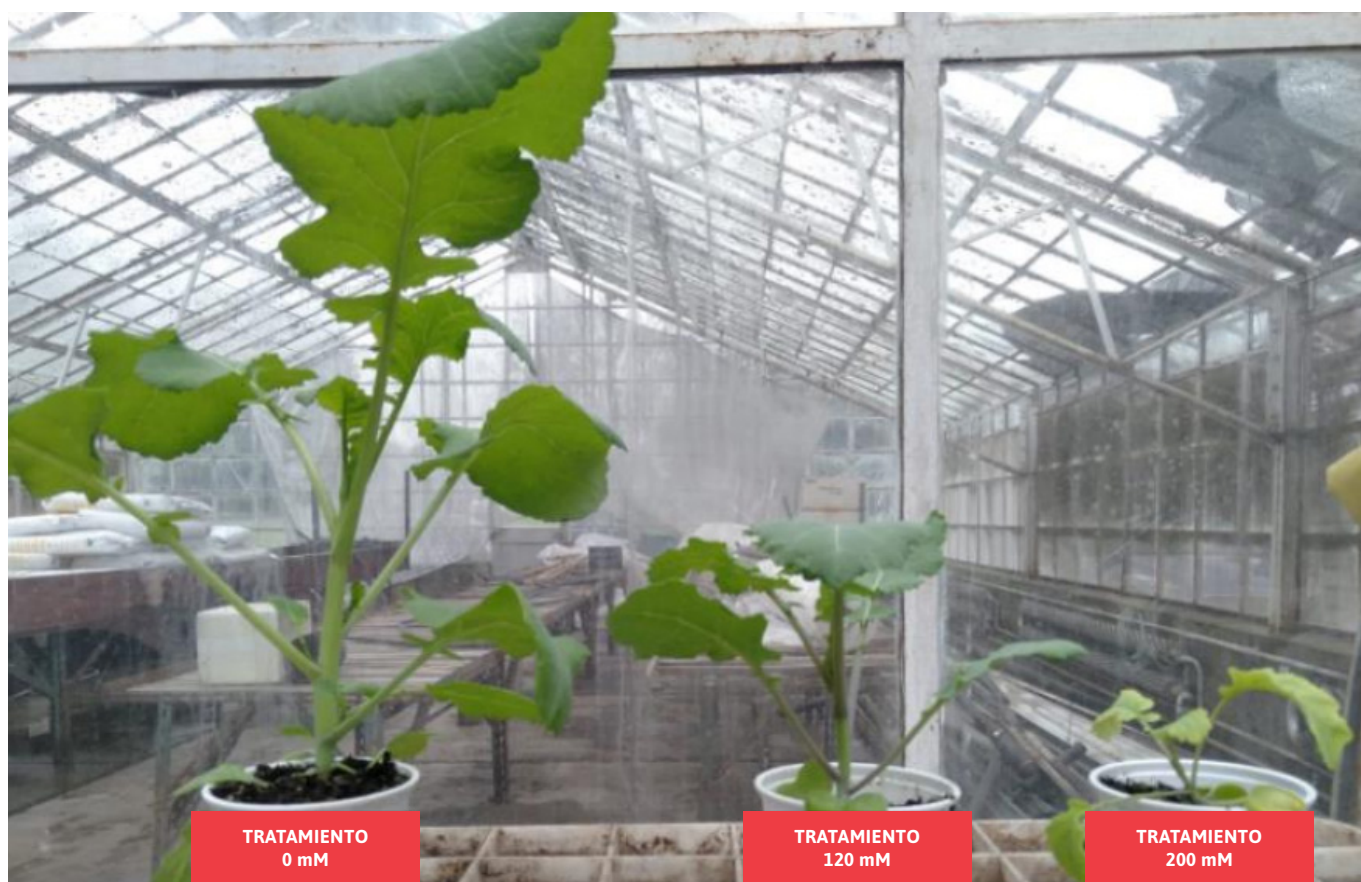


Figura 2. Plantas de “carinata” sometidas a distintas concentraciones salinas de cloruro de sodio. Se puede observar el marcado efecto del estrés salino.


del hongo en ensayos de germinación en condiciones de alta salinidad, con respecto a los tetraploides (García et al, 2016).


Una especie relacionada con la ya mencionada canola, es la mostaza de Etiopía, comúnmente llamada "carinata", un cultivo de cobertura que ha adquirido importancia en Argentina. El aceite se utiliza para producir biocombustibles de segunda generación para aviones, no es comestible. Reúne atributos muy favorables como cultivo de cobertura, lo que aporta sustentabilidad. Es muy rústica, tolerante a la sequía y a los metales pesados, pero no hay información sobre tolerancia a la salinidad. Obtenerla, será de gran valor debido a que la superficie de siembra está incrementando y expandiéndose a zonas con diversas condiciones de suelo. Aplicando protocolos de evaluación similares a los usados en canola, se detectó variabilidad entre cultivares en plantas jóvenes en


concentraciones salinas más altas que las conocidas y diferencias entre tratamientos salinos, que para algunas variables no fueron significativas con el tratamiento testigo (Armani et al, 2021) (*Figura 2*).

La evaluación de la tolerancia a la salinidad en distintas variedades de cultivos es un área muy dinámica. Es necesario hacer evaluaciones en el campo y en muchas especies, probar combinaciones de sales y estudiar los compuestos involucrados en la tolerancia para poder usarlos luego como marcadores para la selección indirecta. La información obtenida por equipos necesariamente multidisciplinares será valiosa para recomendar cultivares a zonas cada vez más salinas, así como para utilizarlos como progenitores en programas de mejoramiento genético destinados a crear nuevos cultivares con tolerancia.

Autores

 **Julia Lúquez** es ingeniera agrónoma y Magister Science en Producción vegetal (UNMDP). Es profesor libre en el departamento de Producción vegetal, suelos e ingeniería rural de la Facultad de Ciencias agrarias, UNMDP. Ha trabajado en mejoramiento genético de plantas y actualmente en tolerancia a la salinidad. jeluquez@mdp.edu.ar

 **Gustavo Eyherabide** es licenciado y doctor en Ciencias químicas (UNLP). Es profesor de Química General e Inorgánica y de Química Analítica en la Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP. Trabaja en mecanismos responsables de la tolerancia a la salinidad. eyherabi@mdp.edu.ar

 **Lucas R. Petigrosso** es ingeniero agrónomo y Magister Science en Producción vegetal (UNMDP). Es docente del área Ecología y responsable del curso "Anatomía y calidad de semillas de gramíneas cultivadas". Trabaja sobre las interacciones entre organismos y medio ambiente, específicamente en el proceso de transmisión de hongos endófitos en gramíneas. lpetigrosso@mdp.edu.ar

Referencias bibliográficas

- Armani, N., Eyherabide, G.A., Petigrosso, L.R., Lúquez, J. (2021). Variabilidad para la tolerancia a la salinidad de plantas jóvenes de mostaza de Etiopía (*Brassica carinata* L.). *Jornadas Argentinas de Genética*. Modalidad virtual, 4 y 5 de noviembre de 2021.
- Ashraf, M., Foolad, M.R. (2013). Crop breeding for salt tolerance in the era of molecular markers and marker assisted selection. *Plant Breeding* 132 (1): 10-20.
- Bahizire, F.B. (2007). Effect of salinity on germination and seedling growth of canola (*Brassica napus* L.). Thesis Master of Agricultural Sciences. University of Stellenbosch, Southafrica. 73 pp.
- Bresler, E., Mc Neal, B., Carter, D.L. (1982). *Saline and sodic soils. Principles-Dynamics-Modeling*. Springer-Verlag. 236 pp.
- Chinnusamy, V., Kang Zhu, J. (2006). Salt stress signaling and mechanisms of plant salt tolerance. In: Setlow, J. K. eds. *Genetic Engineering 2*, pp. 141-177.
- Di Paolo, M., Fabricius, H., Sáinz, M., Gatti, L., Alberti, J., Eyherabide, G. A., Lúquez, J. (2019). Rol de la prolina en la tolerancia a la salinidad de plantas jóvenes de canola y cebada. En *Actas del XIV Encuentro Biólogos en Red*, p. 60.
- FAOSTAT (2018) [en línea] <http://www.faostat.fao.org.html> [consulta: junio de 2018].
- Fowler, J. L. (1991). Interaction of salinity and temperature on the germination of crumble. *Agronomy Journal* 83: 169-172.
- Gartía, D., Colabelli, M., Lúquez, J., Petigrosso, L. (2016). Variabilidad para la tolerancia a la salinidad entre cultivares de raigrás anual (*Lolium multiflorum* Lam) con diferente nivel de ploidía e infección endofítica. En: *1 Jornadas Transdisciplinarias de Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. Rosario. 22 y 23 de septiembre, pp. 545-546.
- Gorham, J., Jones, R.G., Mc Donnell, E. (1985). Some mechanisms of salt tolerance in crop plants. *Plant Soil* 89: 15-40.
- International Rice Research Institute. (2013). [en línea] http://www.knowledgebank.irri.org/ricebreedingcourse/Breeding_for_salt_tolerance.htm [consulta: febrero de 2018].
- Lavado, R.S. (2008). Visión sintética de la distribución y magnitud de los suelos afectados por salinidad en la Argentina. En: Taleisnik, E., Groenberg, K., Santa Maria, G. eds. *La salinización de los suelos en la Argentina: su impacto en la producción agropecuaria*. Córdoba: Universidad Católica de Córdoba, pp. 11-15.
- Lúquez, J., Briguglio, M., Irigoyen, F., Eyherabide, G. (2015). Screening for chloride tolerance in soybean cultivars in Argentina. *Journal of Basic and Applied Genetics (BAG)* 26 (2): 52-61.

- Maas, E.V., Hoffman, G.J. (1977). Crop salt tolerance current assessment. [en línea] J. Irr. Drain. Div. ASCE. http://swrcb2.swrcb.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/sds_srjf/sds/hist_exhibits/1977bdh_p2ex1.pdf [consulta: junio de 2018].
- Morales, D., Bolarín, M. del C., Cayuela, E. (2006). Respuesta de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) a la aplicación de diferentes niveles de NaCl. I. Crecimiento y relaciones hídricas. *Cultivos Tropicales* 27: 27-32.
- Omacini, M., Gundel, P., Semmartin M. G. (2013). *Huellas de la simbiosis pasto endófito en el agroecosistema*. Buenos Aires: División de Microbiología Agrícola y Ambiental, Asociación Argentina de Microbiología.
- Omami, E. N. (2005). Response of amaranth to salinity stress. PhD Thesis. University of Pretoria. Sudáfrica. 200 pp.
- Osmond, C.B., Austin, M.P., Berry, J.A., Billings, W.D., Boyer, J.S., Dacey, J.W.H., Nobel, P.S., Smith, S.D., Winner, W.E. (1987). The survival of plants in any ecosystem depends on their physiological reactions to various stress of the environment. *Bio Science* 37 (1): 38-48.
- Parida, A. K., Das, A.B. (2004). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60: 324-349.
- Rani, C. R., Reema, C., Alka, S., Singh, P.K.(2012). Salt Tolerance of *Sorghum bicolor* Cultivars during Germination and Seedling Growth. *Research Journal of Recent Sciences* 1: 1-10.
- Sharma, S. K. (1983). Mechanism of salt injury in germination and early seedling growth of wheat. *India. Journal Experiment Biology* 21: 690-692.
- Soto, M.B., Echeverría, M.M., Lúquez, J., San Martino, S., Assuero, S.G., Petigrosso, L.R. (2021). Tolerancia a la salinidad de festuca alta, naturalizada y comercial, libre e infectada con endófitos durante la germinación. *Revista de la Facultad de Agronomía* (en prensa)
- Steppuhn, H., Volkmar, K.M., Miller, P.R. (2001). Comparing canola, field pea, dry bean and durum wheat crops grown in saline media. *Crop Science* 41:1827-1833.
- Taleisnik, E. (2021). Mecanismos de tolerancia a la salinidad: su utilización en programas de mejoramiento genético. En: *Estreses abióticos: una aproximación para mitigar sus efectos a través del mejoramiento genético en un contexto de cambio climático. Simposio. Journal of Basic and Applied Genetics* 1 (32) Suppl.: 66.
- Tal, M. (1985). Genetics of salt tolerance in higher plants: theoretical and practical considerations. *Plant and Soil* 89: 199-226.
- Turan, S., Cornish, K., Kumar, S. (2012). Salinity tolerance in plants: Breeding and genetic engineering. *Australian Journal of Crop Science* 6 (9): 1337-1348.
- Wang, Z, Cheng, J., Chen, Z., Huang, J., Bao, Y., Wang, J., Zhang, H. (2012). Identification of QTLs with main, epistatic and QTL x environment interaction effects for salt tolerance in rice seedlings under different salinity conditions. *Theoretical and Applied Genetics* 125: 807-815.