

El Aluminio promueve el crecimiento e incrementa el contenido de macronutrientos en cultivares mexicanos de arroz

GARCÍA-MORALES, Soledad, TREJO-TÉLLEZ, Libia I. y GÓMEZ-MERINO, Fernando C.

S. García, L. Trejo y F. Gómez

´Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.
C. P. 94961

´´Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México, México.
C. P. 56230
gmsoledad@gmail.com

F. Pérez, E. Figueroa, L. Godínez, R. García (eds.) Ciencias de la Economía y Agronomía. Handbook T-II.-©ECORFAN, Texcoco de Mora, México, 2017.

Abstract

Beneficial effects of aluminum (Al) have been reported in plant growth, especially in a hormetic dose-response. Nevertheless, the mechanisms that regulate such positive effects need to be further investigated. The aim of this study was to evaluate the effect of Al on growth and contents of macronutrient in four Mexican rice cultivars: Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo and Temporalero. Twenty-four day-old plants were grown in nutrient solution containing either 0 or 200 μM Al, for 20 days. Al stimulated growth both of roots and shoots in all four cultivars tested, being more notorious the increase in root growth, which was up to two-fold higher in comparison to the control. Contents of all nutrients were higher in plants grown with Al, and in some cases such contents were up to five-fold higher, such as K. We conclude that as a beneficial element, Al stimulates growth and accumulation of N, P, K, Ca and Mg in roots and shoots.

10 Introducción

La toxicidad por aluminio (Al) es un problema severo para la producción de cultivos en suelos ácidos (Poschenrieder *et al.*, 2008). No obstante, se han reportado efectos benéficos del Al en algunas especies que están bien adaptadas a suelos altamente erosionados y ácidos, especialmente en un efecto hormético dosis-respuesta. Los posibles mecanismos que favorecen el crecimiento de las plantas por efecto del Al incluyen la estimulación en la absorción de N, P y K (Osaki *et al.*, 1997), el incremento en la disponibilidad de Fe, así como de la protección contra la toxicidad por Mn (Pilon-Smits *et al.*, 2009). Estos efectos benéficos del Al (considerado generalmente como un elemento potencialmente tóxico y no esencial para plantas superiores), se puede atribuir a la mitigación de un estrés latente que conduce a una respuesta hormética (Poschenrieder *et al.*, 2013). El Al en suelos ácidos se encuentra en la forma iónica Al^{3+} (en pH superior a 5.5 se presentan formas hidroxiladas de Al). Se ha reportado que cuando se aplica Al en bajas concentraciones también puede estimular el crecimiento, mediante el aumento de la actividad antioxidante, incremento en la disponibilidad de P y disminución de la toxicidad del Fe (Ghanati *et al.*, 2005; Pilon-Smits *et al.*, 2009; Watanabe *et al.*, 2005). Estos efectos benéficos se han mostrado no solo en arroz (Osaki *et al.*, 1997; Roselló *et al.*, 2015), sino también en maíz (Piñeros *et al.*, 2005), triticale, alfalfa (Zhang *et al.*, 2007) y girasol (Ziaei *et al.*, 2014). Debido a estos efectos positivos, el Al puede ser utilizado como bioestimulante para inducir crecimiento de las plantas y aumentar la producción de los cultivos. No obstante, las investigaciones sobre los mecanismos relacionados con los efectos benéficos del Al en la fisiología de las plantas son relativamente escasas.

El arroz es uno de los cereales más importantes del mundo. En 2014, este cereal fue cultivado en 124 países, con una producción mundial de 741 millones de toneladas (FAOSTAT, 2015). Entre estos países, México cuenta con condiciones agroclimáticas favorables para su producción (Ortega-Arreola, 2014). Sin embargo, su cultivo ha sido desatendido y actualmente se importa más del 80% de este grano (Martínez-Damián y Hernández-Ortiz, 2012), lo que representa un reto para la seguridad alimentaria del país. Dado que el consumo per cápita de arroz blanco en México es de 7.0 kg, y ocupa el cuarto lugar en la dieta nacional de granos básicos, se requiere realizar investigación tendiente a mejorar la productividad de este cultivo. En México se cultivan más de 54 mil ha de arroz con una producción de 234 mil 690 t y un rendimiento medio de 4.8 t ha⁻¹. Si se compara este rendimiento con las 12.5 t ha⁻¹ que se pueden obtener en China o Japón (Martínez, 2013), es evidente que en México existe una gran necesidad por mejorar este indicador y la nutrición vegetal juega un papel importante en el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. De ahí que el uso de elementos benéficos como el Al surge como una alternativa prometedora para mejorar estos índices de producción, aunado a que se ha demostrado que el arroz posee mecanismos más eficientes para metabolizar Al, en comparación con otros cereales como maíz, sorgo y trigo (Famoso *et al.*, 2010; 2011).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del aluminio (0 y 200 μM) en el crecimiento y contenido de N, P, K, Ca y Mg en plantas de cuatro cultivares mexicanos de arroz, durante la etapa vegetativa del cultivo.

10.1 Materiales y métodos

10.1.1 Cultivares de arroz y condiciones experimentales

Se utilizaron cuatro cultivares mexicanos de arroz (*Oryza sativa* L. ssp. indica): Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero, provenientes del Banco de Germoplasma del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el Campo Experimental Zacatepec, Morelos, México (18° 39' LN, 99° 12' LO+, 910 msnm).

Previo a la germinación, las semillas fueron desinfectadas con etanol al 70% durante 7 min, después remojadas en hipoclorito de sodio al 3% y una gota de Tween[®] 20 durante 30 min. Posteriormente, fueron enjuagadas con agua estéril cinco veces y secadas en papel filtro para después ser colocadas en frascos con medio MS (Murashige y Skoog, 1962), suplementado con 3% (p/v) de sacarosa y solidificado con 0.8% de agar. Los frascos fueron incubados en oscuridad a 28 °C durante 72 h.

Once días después de la germinación, las plantas fueron trasplantadas en recipientes con 12 L de solución nutritiva Yoshida, con las siguientes concentraciones: 1.43 mM NH_4NO_3 , 1.00 mM $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 1.64 mM $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1.3 mM K_2SO_4 , 0.32 mM $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 1.00 mM Fe-EDTA, 7.99 μM $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.15 μM $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.15 μM $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.075 μM $(\text{NH}_4)_6\text{M}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y 1.39 μM H_3BO_3 (Yang *et al.*, 1994). El pH de la solución fue ajustado a 5.5. Después de 13 días del trasplante, la solución nutritiva fue completamente reemplazada y las plantas de arroz fueron crecidas en el tratamiento testigo (sin Al) o sometidas a tratamiento con Al (200 μM AlCl_3 a pH 4.2) durante 20 días. La solución hidropónica fue renovada cada 4 días. Esta fase experimental se llevó a cabo en invernadero.

10.1.2 Crecimiento relativo de planta

Las plantas tratadas con 0 y 20 μM se colectaron después de 20 días, luego se separaron en vástago y raíz. La altura de planta fue determinada midiendo de la base del vástago a la punta de la hoja bandera. El crecimiento de la raíz fue determinado midiendo de la base del vástago a la punta de la raíz más larga. El crecimiento relativo fue determinado dividiendo el valor de crecimiento de vástago y raíz en el tratamiento con Al sobre el crecimiento de las plantas testigo (sin Al) $\times 100\%$.

10.1.3 Contenido nutrimental

Para obtener el contenido nutrimental se determinó el peso de la materia seca y la concentración nutrimental. El peso de la materia seca se estimó 48 h después de secar las muestras a 70 °C en una estufa de circulación de aire forzado (Rissa Brand HCF-125D, Monterrey, N.L., México).

Una vez que las muestras estuvieron secas, éstas se molieron, pesaron y se sometieron a digestión húmeda con una mezcla de ácidos perclórico y nítrico (Alcántar y Sandoval, 1999). Para la determinación de Al, P, K, Ca y Mg, los extractos obtenidos fueron analizados y leídos en un equipo de espectrometría de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (Agilent ICP-AES, modelo 725-ES, Victoria, Australia). La determinación de N total se llevó a cabo empleando el método Semimicro-Kjeldahl descrito por Bremner (1996), usando una mezcla catalítica, agregando ácido sulfúrico-salicílico para la digestión.

10.1.4 Análisis estadístico

Los resultados mostrados son medias \pm desviación estándar, de al menos cuatro plantas independientes por variedad y tratamiento. Los datos obtenidos fueron analizados mediante el software estadístico SAS (SAS Institute, 2009).

Se realizó análisis de varianza por ANOVA así como comparación de medias usando la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 95% ($P \leq 0.05$), para determinar diferencias estadísticas.

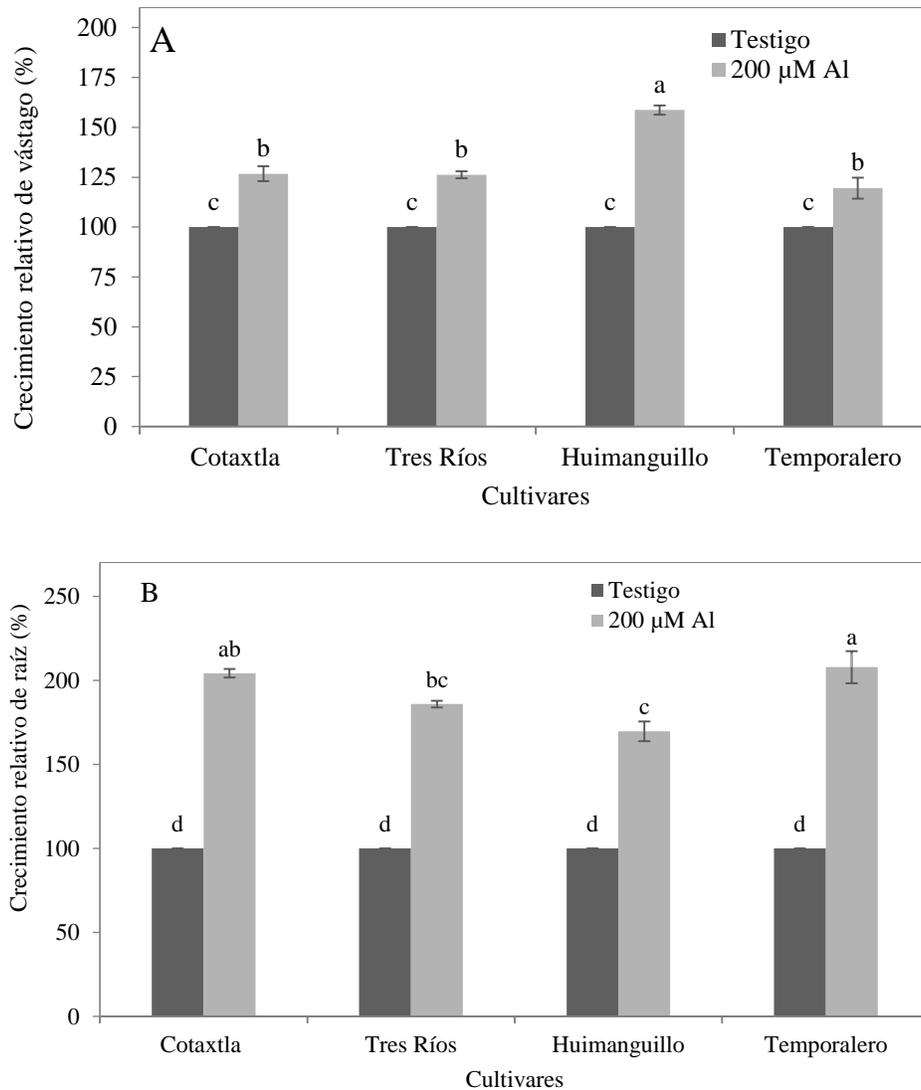
10.2 Resultados

En este trabajo se evaluó la aplicación de 0 y 200 μM de Al en el crecimiento y contenido de macronutrientes en plantas de cuatro cultivares de arroz. El crecimiento relativo del vástago (parte aérea) en plantas crecidas en presencia de Al fue 26% en los cultivares Cotaxtla y Tres Ríos; mientras que en Huimanguillo se incrementó el crecimiento relativo 58%.

El menor crecimiento relativo de vástago se observó en Temporalero con sólo 19% (Gráfico 10A). El efecto más notable del Al se obtuvo en el crecimiento de raíz (Figura 10). En los cultivares Cotaxtla y Temporalero expuestos a Al se registró más del doble de longitud de raíz que el testigo, mientras que en Tres Ríos se registró 85% de crecimiento relativo de raíz y en Huimanguillo de 69% (Gráfico 10B).

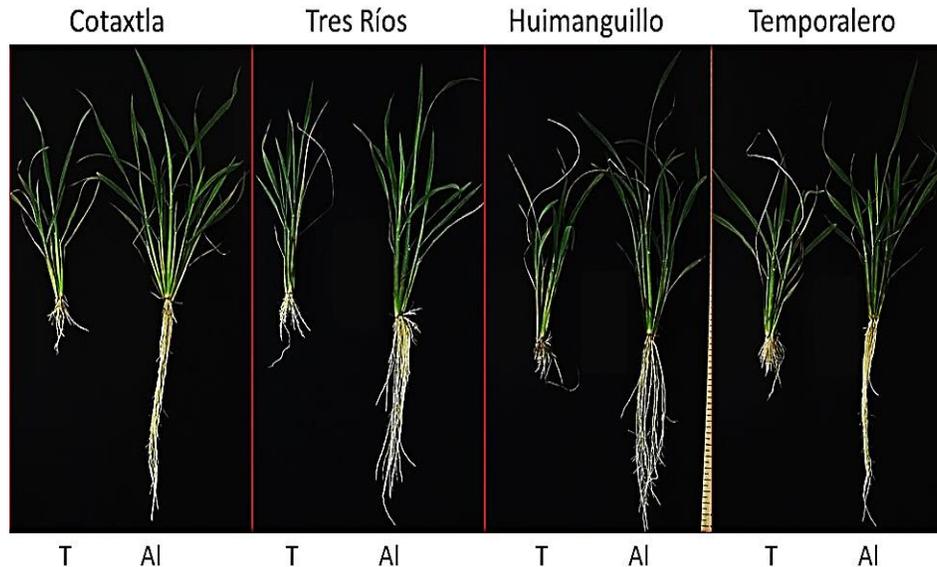
Resultados semejantes han sido reportados en otros cultivares de arroz, donde la aplicación de diferentes concentraciones de Al promovieron el crecimiento tanto de vástago como de raíz (Osaki *et al.*, 1997; Moreno-Alvarado *et al.*, 2017). También se ha reportado estimulación del crecimiento en plantas de té (*Camellia sinensis* L.) expuestas a 50, 100 y 300 μM de Al (Hajiboland *et al.*, 2013). Otros resultados reportados en los cultivares de arroz Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero difieren los obtenidos en este trabajo, y aunque no se reporta estimulación, tampoco se indica reducción significativa de la altura de planta y de la longitud de raíz (Marín-Garza *et al.*, 2010; Gómez-Merino *et al.*, 2014).

Gráfico 10 Crecimiento relativo de vástago (A) y raíz (B) de plantas de los cultivares de arroz Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero bajo tratamiento con 0 (Testigo) y 200 μM de aluminio (Al) durante 20 días



Se presenta el promedio de cuatro plantas, \pm desviación estándar. Letras distintas en cada columna de cada subfigura indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$)

Figura 10 Crecimiento de vástago y raíz de los cultivares de arroz Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero. Las plantas fueron crecidas en 0 (T; Testigo) y 200 μM de aluminio (Al; Aluminio) durante 20 días



El contenido de Al fue superior en las plantas tratadas con 200 μM de Al en comparación con el testigo, en todos los cultivares evaluados. El mayor contenido de Al se encontró en vástago y raíz del cultivar Temporalero, en tanto que el menor contenido de este elemento se observó en vástago de Cotaxtla y en raíz de Huimanguillo.

El contenido de N fue mayor en vástago que en raíz, en los cuatro cultivares evaluados; y éste incrementó con la aplicación de Al en la solución nutritiva, comparado con el testigo. El mayor contenido de N se encontró en vástago de Cotaxtla y en raíz de Temporalero; en ambos casos el contenido de N fue dos veces más alto que en el testigo (Tabla 10).

A pesar de que se usaron reactivos grado analítico para la preparación de la solución nutritiva (pureza $\geq 99\%$) es posible encontrar cantidades traza de Al en el tratamiento testigo (0 μM Al), lo cual se ve reflejado en el contenido de Al en raíz y vástago de plantas crecidas en el tratamiento sin Al (0 μM). Situaciones semejantes se han observados en otros trabajos publicados (Marín-Garza *et al.*, 2010, Hajiboland *et al.*, 2013, Gómez-Merino *et al.*, 2014; Roselló *et al.*, 2015). Hajiboland *et al.* (2013) atribuyeron la acumulación de Al en hojas y raíz de plantas testigo al contenido de Al derivado de las semillas y los reactivos empleados en la solución nutritiva.

En el caso de Roselló *et al.* (2015) reportan concentraciones de Al superiores en el tratamiento testigo (sin Al) que en el tratamiento con 500 μM Al, en vástago de plantas de arroz Nipponbare, indicando que es el resultado de un mecanismo de exclusión de Al de este genotipo.

Tabla 10 Efecto del aluminio en el contenido (mg planta⁻¹) de aluminio (Al) y nitrógeno (N) en vástago y raíz de plantas de arroz, cultivares Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero, crecidas en solución nutritiva con 0 (testigo) y 200 µM Al, durante 20 días

Variedad	Aluminio (µM)	Aluminio (Al)		Nitrógeno (N)	
		Vástago	Raíz	Vástago	Raíz
Cotaxtla	0	7.6 c	0.0 c	9048.9 de	1551.7 cd
	200	17.4 ab	84.2 b	21821.1 a	3455.1 ab
Tres Ríos	0	8.1 c	0.3 c	8782.8 de	1856.4 cd
	200	20.5 a	76.2 b	15944.5 bc	2610.4 bc
Huimanguillo	0	5.4 c	0.0 c	6285.8 e	1101.6 d
	200	17.9 ab	59.8 a	14032.7 cd	2868.1 bc
Temporalero	0	11.5 bc	0.0 c	9948.4 de	1570.9 cd
	200	24.8 a	107.4 a	19634.4 ab	4622.4 a
Diferencia mínima significativa		9.0	22.7	5481.5	1351.5

Los datos representados en cada columna corresponden a la media de cuatro plantas independientes. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$)

Similar a lo encontrado en el contenido de N, el contenido de P y K fue mayor en el tratamiento con Al comprado con el testigo (Tabla 10.1). Debido a que se obtuvo mayor peso de materia seca en vástago que en raíz, el contenido de los macronutrientes es superior en vástago; aunque el efecto más visible del Al se tuvo en la longitud de raíz y en algunos casos en el número de macollos, como se observa en Cotaxtla (Figura 10).

Tabla 10.1 Efecto del aluminio en el contenido (mg planta⁻¹) de fósforo (P) y potasio (K) en vástago y raíz de plantas de arroz, cultivares Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero, crecidas en solución nutritiva con 0 (testigo) y 200 µM Al, durante 20 días

Variedad	Aluminio (µM)	Fósforo (P)		Potasio (K)	
		Vástago	Raíz	Vástago	Raíz
Cotaxtla	0	2352.3 de	219.4 ef	2793.7 cd	330.3 de
	200	3804.5 b	880.9 b	5954.8 a	1731.9 a
Tres Ríos	0	2466.0 cde	308.0 de	2656.5 cd	456.7 cd
	200	3341.0 bcd	701.2 c	4616 ab	1195.0 b
Huimanguillo	0	1833.4 e	136.6 f	1998.4 d	221.7 e
	200	2830.1 bcde	654.8 c	3917.5 bc	1206.3 b
Temporalero	0	3647.3 bc	343.2 d	3130.0 cd	532.2 c
	200	5064.3 a	1090.6 a	4975.5 ab	1572.4 a
Diferencia mínima significativa		1204.8	102.5	1425.1	180.1

Los datos representados en cada columna corresponden a la media de cuatro plantas independientes. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$)

El mayor contenido de P se encontró en vástago y raíz de Temporalero tratado con Al (Tabla 2), aunque proporcionalmente Huimanguillo y Cotaxtla tuvieron 1.5 veces más P en vástago tratado con Al que en el testigo, que Temporalero con 1.4 veces; mientras que en raíz Huimanguillo tuvo 4.7 veces más P que su testigo, Cotaxtla 4.0 veces y Temporalero 3.1. Tres Ríos tuvo la menor proporción de P en vástago (1.3 veces) y raíz (2.2 veces), respecto a los testigos.

En el contenido de K de vástago, plantas del cultivar Cotaxtla tratadas con Al tuvieron mayor contenido y 2 veces más K que las plantas testigo. El resto de los cultivares tratados con Al tuvieron en promedio 1.5 veces más K que el testigo. En lo que se refiere al contenido de K en raíz, en los cultivares Cotaxtla y Huimanguillo tratados con Al se encontró 5 veces más K y en Tres Ríos y Temporalero se obtuvo alrededor de 2 veces más K con respecto a los testigos (Tabla 2). Resultados semejantes se reportaron en el cultivar de arroz Michikogane, donde se encontró que el Al (3 mg L^{-1}) incrementa la cantidad relativa de N, P, K, Ca y Mg, en mayor proporción P, Ca y Mg (Osaki *et al.*, 1997). El alto contenido de K en el tratamiento con Al podría deberse a la disminución en el flujo neto de salida del K más que al incremento en su absorción (Sasaki *et al.*, 1995).

Contrario a lo reportado en otras investigaciones donde indican que la exposición a Al por periodos prolongados de tiempo pueden provocar deficiencias de Ca, Mg, N, P y K (Lenoble *et al.*, 1996; Mariano y Keltjens, 2005), en este trabajo se encontró que el contenido de estos macronutrientes fue superior en plantas tratadas con Al que en plantas testigo, en los cuatro cultivares evaluados. El mayor contenido de Ca y Mg se obtuvo en vástago y raíz de Temporalero (Tabla 10.2). Al respecto, Bose *et al.* (2015) indican que las plantas que incrementan la absorción de P, Ca y Mg y crecen bien en condiciones de estrés por Al, han desarrollado una mayor capacidad para absorber H^+ y al mismo tiempo para prevenir la acidificación citoplásmica. Además, de acuerdo a lo propuesto por Pilon-Smits *et al.* (2009) sugieren que el Al incrementa la disponibilidad de P, para luego ser absorbido por las plantas.

Tabla 10.2 Contenido (mg planta^{-1}) de calcio (Ca) y magnesio (Mg) en vástago y raíz de plantas de arroz, cultivares Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero, crecidas en solución nutritiva con 0 (testigo) y $200 \mu\text{M}$ Al, durante 20 días

Variedad	Aluminio (μM)	Calcio (Ca)		Magnesio (Mg)	
		Vástago	Raíz	Vástago	Raíz
Cotaxtla	0	308.6 c	93.8 bcd	798.6 cd	62.6 de
	200	561.3 ab	160.4 a	1771.8 ab	198.4 a
Tres Ríos	0	274.2 c	79.1 de	765.6 d	85.6 cd
	200	558.8 ab	128.9 abc	1713.1 ab	183.1 a
Huimanguillo	0	225.7 c	45.1 e	636.8 d	39.9 e
	200	359.5 bc	138.4 a	1361.3 bc	157.3 b
Temporalero	0	282.6 c	87.2 cde	1131.0 cd	90.3 c
	200	604.1 a	135.6 ab	2268.5 a	204.7 a
Diferencia mínima significativa		203.2	46.8	584.8	28.2

Los datos representados en cada barra corresponden a la media de cuatro plantas. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

10.3 Conclusiones

El Al estimuló el crecimiento de vástago y raíz en plantas de los cuatro cultivares mexicanos de arroz evaluados: Cotaxtla, Tres Ríos, Huimanguillo y Temporalero. El efecto benéfico del Al fue encontrada en mayor proporción en raíz que en vástago, obteniendo hasta el doble de longitud en los cultivares Cotaxtla y Temporalero.

El Al no disminuyó el contenido de N, P, K, Ca y Mg en raíz y vástago, al contrario se observó que tuvo un efecto sinérgico en el contenido de estos macronutrientes tanto en vástago como en raíz, en los cuatro cultivares. En todos los casos el contenido fue superior en vástago que en raíz.

El Al como elemento benéfico incrementa la disponibilidad de P, para ser absorbido por las plantas, lo que se refleja en un mayor contenido de este macronutriente en vástago y raíz de las plantas crecidas en Al.

10.4 Agradecimientos

A la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento 1 en Eficiencia y Sustentabilidad en la Producción Primaria en Sistemas Agroalimentarios del Programa de Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable del Campus Córdoba por los apoyos para la realización de esta investigación.

10.5 Referencias

Alcántar, G. G., & Sandoval, V. M. (1999). *Manual de análisis químico de tejido vegetal*. Chapingo, México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Bose, J., Babourina, O., Ma, Y., Zhou, M., Shabala, S., & Rengel, Z. (2015). Specificity of ion uptake and homeostasis maintenance during acid and aluminium stresses. In *Aluminium stress adaptation in plant* (pp. 229-251). Switzerland: Springer International Publishing.

Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-Total. In: *Methods of soil analysis* (1085-1121). Wisconsin, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.

Famoso, A. N., Clark, R. T., Shaff, J. E., Craft, E., McCouch, S. R., & Kochian, L. V. (2010). Development of a novel aluminum tolerance phenotyping platform used for comparisons of cereal aluminum tolerance and investigations into rice aluminum tolerance mechanisms. *Plant Physiology*, 153(4), 1678-1691.

Famoso, A. N., Zhao, K., Clark, R. T., Tung, C. W., Wright, M. H., Bustamante, C., et al. (2011). Genetic architecture of aluminum tolerance in rice (*Oryza sativa*) determined through genome-wide association analysis and QTL mapping. *PLoS Genetic*, 7(8), e1002221.

FAOSTAT. (2015). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, División de Estadística Visitado 21 julio 2016. <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S>

Ghanati, F., Morita, A., & Yokota, H. (2005). Effects of aluminium on the growth of tea plant and activation of antioxidant system. *Plant and Soil*, 276(1), 133-141.

Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., & Marín-Garza, T. (2014). Concentración de micronutrientos y crecimiento de raíz en variedades de arroz expuestas a aluminio. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 243-248.

Hajiboland, R., Rad, S. B., Barceló, J., & Poschenrieder, C. (2013). Mechanisms of aluminum-induced growth stimulation in tea (*Camellia sinensis*). *Journal Plant Nutrition and Soil Science*, 176(4), 616-625.

Lenoble, M. E., Blevins, D. G., Sharp, R. E., & Cumbie, B. G. (1996). Prevention of aluminium toxicity with supplemental boron. I. Maintenance of root elongation and cellular structure. *Plant, Cell and Environment*, 19(10), 1132-1142.

- Mariano, E. D., & Keltjens, W. G. (2005). Long-term effects of aluminum exposure on nutrient uptake by maize genotypes differing in aluminum resistance. *Journal of Plant Nutrition*, 28(2), 323-333.
- Marín-Garza, T. Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Muñoz-Orozco, A., Tavitas-Fuentes, L., Hernández-Aragón, L., et al. (2010). Respuestas fisiológicas y nutrimentales de variedades de arroz a la concentración de aluminio. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(1), 37-44.
- Martínez-Damián, A., & Hernández-Ortiz, J. (2012). Importaciones de granos básicos y precio interno en México: un enfoque de sistema de demanda inverso. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 9, 401-410.
- Martínez, M. P. (2013). *Podrían bajar hasta 60% importaciones de arroz: Productores. El Economista*. Recuperado el 20 de julio de 2016, de <http://eleconomista.com.mx/industrias/2013/12/23/podrian-bajar-hasta-60-importaciones-arroz-productores>
- Moreno-Alvarado, M., García-Morales, S., Trejo-Téllez, L.I., Hidalgo-Contreras, J.V., & Gómez-Merino, F.C. (2017). Aluminum enhances growth and sugar concentration, alters macronutrient status and regulates the expression of NAC transcription factors in rice. *Frontiers in Plant Science*, 8, 73.
- Murashige, T. & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.
- Ortega-Arreola, R. (2014). *Manual para la producción de semilla de arroz*. México: INIFAP.
- Osaki, M. T., Watanabe, T., & Tadano, T. (1997). Beneficial effect of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43(3), 551-563.
- Pilon-Smits, E., Quinn, C. F., Tapken, W., Malagoli, M., & Schiavon, M. (2009). Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 267-274.
- Piñeros, M. A., Shaff, J. E., Manslank, H. S., Carvalho Alves, V. M., Kochian, L. V. (2005). Aluminum resistance in maize cannot be solely explained by root organic acid exudation. A comparative physiological study. *Plant Physiology*, 137(1), 231-241.
- Poschenrieder, C., Gunsé, B., Corrales, I., & Barceló, J. (2008). A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the Total Environment*, 400(1-3), 356-368.
- Poschenrieder, C., Cabot, C., Martos, S., Gallegos, B., & Barceló J. (2013). Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Science*, 212, 15-25.
- Roselló, M., Poschenrieder, C., Gunsé, B., Barceló, J., & Llugany, M. (2015). Differential activation of genes related to aluminium tolerance in two contrasting rice cultivars. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 152, 160-166.
- SAS Institute Inc. (2009). *SAS/STAT 9.2 User's guide*. (2nd ed.) Cary, N. C: SAS Institute Inc.
- Sasaki, M., Kasai, M., Yamamoto, Y., & Matsumoto, H. (1995). Involvement of plasma membrane potential in the tolerance mechanism of plant roots to aluminum toxicity. *Plant and Soil*, 171(1), 119-124.

- Watanabe, T., Jansen, S., & Osaki, M. (2005). The beneficial effect of aluminium and the role of citrate in Al accumulation in *Melastoma malabathricum*. *New Phytology*, 165(3), 773-780.
- Yang, X., Römheld, V., & Marschner, H. (1994). Effect of bicarbonate on root-growth and accumulation of organic-acids in Zn-Inefficient and Zn-efficient rice cultivars (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 164(1), 1-7.
- Zhang, X., Humphries, A., & Auricht, G. (2007). Genetic variability and inheritance of aluminium tolerance as indicated by long root regrowth in lucerne (*Medicago sativa* L.). *Euphytica*, 157(1), 177-184.
- Ziaei, N., Rezaiatmand, Z., & Ranjbar, M. (2014). Study of aluminum toxicity on photosynthetic pigment, soluble sugars and proline contents in two sunflower varieties. *Research on Crop Ecophysiology*, 9(2), 105-113.