



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

---

**CAMPUS CÓRDOBA**

**DOCTORADO EN CIENCIAS  
POR INVESTIGACIÓN**

**RESPUESTA DE DOS VARIEDADES DE CAÑA AZÚCAR  
AL ESTRÉS OSMÓTICO EN CONDICIONES  
*IN VITRO* E HIDROPONIA**

**ODÓN CASTAÑEDA CASTRO**

**T E S I S**  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**CONGREGACIÓN MANUEL LEÓN, AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ**

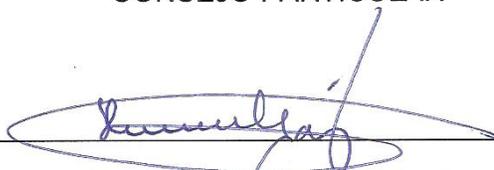
**2014**

La presente tesis titulada: **Respuesta de dos variedades de caña de azúcar al estrés osmótico en condiciones *in vitro* e hidroponía**, realizada por el alumno: **Odón Castañeda Castro**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS POR INVESTIGACIÓN

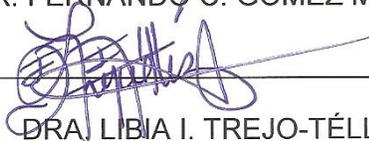
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. FERNANDO C. GÓMEZ MERINO

ASESOR:



DRA. LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ

ASESOR:

DR. VICTORINO MORALES RAMOS

ASESOR:



DRA. YOLANDA M. MARTÍNEZ OCAMPO

ASESOR:



DRA. MARÍA TERESA GONZÁLEZ ARNAO

ASESOR:



DR. ROBERTO GÁMEZ PASTRANA

Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz. Septiembre de 2014

## RESUMEN

### RESPUESTA DE DOS VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR AL ESTRÉS OSMÓTICO EN CONDICIONES *IN VITRO* E HIDROPONÍA

Odón Castañeda Castro, D. C.  
Colegio de Postgraduados, 2014

En esta investigación se realizaron dos experimentos. En el primer experimento se evaluó la respuesta de plántulas dos variedades de caña de azúcar, Mex 69-290 y CP 72-2086, al tratamiento con NaCl (0, 50 y 100 mM) en hidroponía. Las variables medidas en este experimento fueron la concentración de Na, K, Ca y Mg, y su relación de acumulación respecto a Na, además de la concentración de prolina. Las relaciones de acumulación entre macronutrientes y Na, y la sumatoria de nutrientes respecto a Na, fueron siempre superiores en la variedad CP 72-2086. Con relación a prolina, la variedad Mex 69-290 mostró mayores niveles de este aminoácido, aunque estos fueron disminuyendo a medida que aumentó la salinidad en el medio, en tanto que en la variedad CP 72-2086 no hubo efectos significativos de los tratamientos, pero se pudo apreciar una ligera tendencia a aumentar el aminoácido a medida que aumento la salinidad. La variedad CP 72-2086 mostró mayor tolerancia a NaCl al registrar capacidad de exclusión de sodio en el vástago. En el segundo experimento se evaluó el efecto del estrés osmótico inducido por la adición de polietilenglicol 6000 (PEG-6000) sobre la concentración de los macronutrientes N, P, K, Ca, Mg y P, en plántulas de las dos variedades de caña de azúcar Mex 69-290 y CP 72-286. Las plántulas de 10 días de edad fueron expuestas a potenciales osmóticos de -0,18, -0,45, -0,60, y -0,80 MPa inducidos con la adición de PEG-6000 en el medio de cultivo líquido. Las plantas se cosecharon 20 y 30 días después del tratamiento. La interacción entre los factores (variedad y potencial osmótico) mostró efectos altamente significativos en la mayoría de los elementos minerales. Los nutrientes más afectados por los tratamientos fueron N y Ca. La variedad Mex 69-290 respecto a la variedad CP 72-2086 mostró mayor tolerancia al estrés osmótico inducido por PEG.

**Palabras clave:** *Saccharum*, nutrición vegetal, estrés abiótico, prolina, sodicidad.

**ABSTRACT**  
**RESPONSES OF TWO SUGARCANE VARIETIES TO OSMOTIC STRESS**  
**UNDER *IN VITRO* CONDITIONS AND HYDROPONICS**

Odón Castañeda Castro, D. C.  
Colegio de Postgraduados, 2014

In this research two experiments were established. In the first one the responses of two sugarcane varieties, namely Mex 69-290 and CP 72-2086, to NaCl (0, 50 and 100 mM) in hydroponics was evaluated. Variables measured in this experiment were concentration of Na, K, Ca and Mg, their accumulation relation regarding Na, and proline concentration. The accumulation relation between macronutrients and Na, and the sum of macronutrients regarding Na, were always higher in the variety CP-72-2086. Regarding proline, the variety Mex 69-290 showed higher contents of this amino acid, though such levels diminished as the levels of NaCl increased, while in the variety CP 72-2086 no significant effects of treatments were observed, although a light increase (not significant) was also appreciated. Therefore, the variety CP 72-2086 showed more tolerance to NaCl as it displayed higher capacity of Na exclusion. In the second experiment, the effect of artificial dehydration induced by polyethylene-glycol (PEG-6000) in the two sugarcane varieties used was investigated *in vitro*. The osmotic potentials were varied by adding different amounts of PEG to produce either -0,18, -0,45, -0,60, or -0,80 MPa in the nutrient medium. The variables measured were the concentrations of the macronutrients N, P, K, Ca, Mg and P) in 10-day old plantlets of the varieties Mex 69-290 and CP 72-286. Plants were harvested either 20 or 30 days after treatments. Interactions between factors (variety and PEG concentration) showed significant effects on the concentration of most nutrients measured. Nitrogen and Calcium were the macronutrients most affected by the osmotic potential under our experimental conditions. The variety Mex 69-290 showed a better performance on the osmotic stress induced by PEG, in comparison to CP 72-2086.

**Keywords:** *Saccharum*, plant nutrition, abiotic stress, proline, sodicity.

## DEDICATORIAS

A Dios por darme la vida, familia y amigos, quienes han hecho de mi vida, una experiencia increíble.

A mis hijos Pedro Luis y Ana Luisa por ser quienes me impulsan en todo momento y por hacer maravillosa mi vida.

A Miriam por ser, desde siempre, el amor de mi vida, mejor amiga y por estar en todo momento conmigo, te amo.

A Oli por ser mi apoyo en todo momento, te extraño.

A mi Abuela por hacer de mí una persona de bien, por darme tanto amor y cariño, te quiero y extraño mucho.

A las familias Pastelín Solano, Balderas Solano y Santamand Solano, por ser parte fundamental en mi vida.

A mis hermanos y mis sobrinas por ser parte de mi familia.

Al I.Q. Jobo Lara Faticatti, por su confianza y apoyo; mi agradecimiento incondicional.

Al Químico Jorge Rivadeneira, por su constante apoyo, mil gracias

## AGRADECIMIENTOS

A Fideicomiso Institucional de Colegio de Postgraduados por el apoyo económico brindado.

Al Colegio de Postgraduados Campus Córdoba y Campus Montecillo, al Laboratorio de Nutrición Vegetal y a la Línea Prioritaria de Investigación 5 “Biotecnología microbiana, vegetal y animal”, por las facilidades brindadas para completar este importante paso en mi carrera académica.

A la Universidad Veracruzana, por el impulso en la superación académica.

Al Dr. Fernando C. Gómez Merino, por su tolerancia, apoyo incondicional y por ser ejemplo de honestidad, dedicación y profundo respeto al trabajo.

A la Dra. Libia I. Trejo Téllez, por el apoyo brindado durante el desarrollo de mi trabajo de investigación en su laboratorio.

A la Dra. Yolanda M. Martínez Ocampo, por el apoyo incondicional, atinados consejos y por confiar en mí.

A los integrantes de mi consejo particular, Dr. Victorino Morales Ramos, Dra. Ma. Teresa González Arnao y Dr. Roberto Gámez Pastrana, por enriquecer mi trabajo y ser parte de mi formación doctoral.

Al personal del Área de Nutrición Vegetal, por el apoyo en el desarrollo de mi trabajo de investigación.

## CONTENIDO

|  | Página    |
|--|-----------|
| RESUMEN .....  | i         |
| ABSTRACT .....   | ii        |
| DEDICATORIAS .....   | iii       |
| AGRADECIMIENTOS .....  | iv        |
| ÍNDICE DE CUADROS.....   | vii       |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | ix        |
| <br>   |           |
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>   | <b>1</b>  |
| LITERATURA CITADA .....  | 12        |
| <br>   |           |
| <b>CAPÍTULO 2. RESPUESTAS DE LAS VARIEDADES Mex 69-290 Y<br/>CP 72-2086 A LA SALINIDAD .....</b> | <b>17</b> |
| RESUMEN .....  | 17        |
| INTRODUCCIÓN.....  | 18        |
| MATERIALES Y MÉTODOS.....  | 20        |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....  | 22        |
| CONCLUSIONES .....   | 39        |
| LITERATURA CITADA .....  | 40        |

|   | Página |
|---|--------|
| <b>CAPÍTULO 3. OSMOTIC STRESS INDUCED BY POLYETHYLEN-<br/>GLYCOL ALTERS MACRONUTRIENT CONCENTRATION OF<br/>SUGARCANE PLANTS <i>IN VITRO</i> .....</b> | 43     |
| ABSTRACT .....  | 43     |
| INTRODUCTION .....  | 44     |
| MATERIALS AND METHODS .....   | 47     |
| RESULTS AND DISCUSSION .....  | 49     |
| CONCLUSIONS .....   | 58     |
| REFERENCES .....  | 59     |
| <br>  |        |
| <b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES<br/>GENERALES .....</b>   | 64     |
| CONCLUSIONES GENERALES .....  | 64     |
| RECOMENDACIONES .....   | 66     |
| <br>  |        |
| <b>ANEXO</b>  | 68     |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   | Página |
|---|--------|
| <b>CAPÍTULO 2.</b>  |        |
| <b>Cuadro 1.</b> Efectos de la concentración de NaCl en la solución nutritiva durante 10 días en la concentración de macronutrientes Ca, Mg y K, y de Na, en vástagos de dos variedades de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290) ..... | 22     |
| <b>Cuadro 2.</b> Efectos simples de las variedades y concentraciones de NaCl en la solución nutritiva, en las concentraciones de K, Ca, Mg y Na en vástagos .....   | 25     |
| <b>Cuadro 3.</b> Efectos de la concentración de NaCl en la solución nutritiva durante 10 días en la acumulación de macronutrientes Ca, Mg y K, y de Na, en vástagos de dos variedades de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290) .....   | 27     |
| <b>Cuadro 4.</b> Efectos simples de las variedades y concentraciones de NaCl en la solución nutritiva, en las acumulaciones de K, Ca, Mg y Na en vástagos de caña de azúcar .....   | 30     |

**Cuadro 5.** Relaciones de acumulación de cationes esenciales respecto a sodio en vástagos de caña de azúcar, en función de la variedad y de la concentración de NaCl en la solución nutritiva ..... 34

**Cuadro 6.** Efecto de la adición de tres concentraciones de NaCl (0, 50 y 100 mM) en la solución nutritiva durante 10 días en la concentración foliar de prolina de dos variedades de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290) ..... 35

**CAPÍTULO 3.**

**Table 1.** Effect of PEG concentration in the nutrient solution, variety and the interactions between both factors on the concentration of macronutrient in sugarcane plants *in vitro* under osmotic stress induced by PEG 6000, 20 and 30 days after treatment ..... 50

**Table 2.** Effect of the factor **variety** on the concentration of macronutrients of sugarcane plants under osmotic stress induced by PEG 6000 *in vitro*, 20 and 30 days after treatment ..... 52

|  | Página |
|--|--------|
| <b>Table 3.</b> Effect of the factor <b>PEG</b> concentration on the content of macronutrients of sugarcane plants under osmotic stress induced by PEG 6000 <i>in vitro</i> , 20 and 30 days after treatment ..... | 53     |

### ÍNDICE DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| <b>CAPÍTULO 2.</b>   |        |
| <b>Figura 1.</b> Efectos principales de variedad (A) y de concentración de NaCl en la solución nutritiva (B) en la concentración de macronutrientes Ca, Mg y K, y de Na en vástagos de plantas de caña de azúcar ..... | 24     |
| <b>Figura 2.</b> Efecto principal de variedad en la acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar .....  | 28     |
| <b>Figura 3.</b> Efecto principal de la concentración de NaCl en la solución nutritiva, en la acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar .....                        | 29     |

**Figura 4.** Relaciones de acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar en función de la variedad ..... 31

**Figura 5.** Relaciones de acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar, en función de la concentración de NaCl en la solución nutritiva ..... 33

**Figura 6.** Efectos principales de variedad (A), de la concentración de NaCl en la solución nutritiva (B) y la interacción de éstos (C) en la concentración foliar de prolina en caña de azúcar ..... 38

**CAPÍTULO 3.**

**Figure 1.** Macronutrient concentration in sugarcane Mex 79-290 and CP 72-2086 plants 20 (left side) and 30 (right side) days after PEG 6000 treatment .. 55

La presente tesis titulada: **Respuesta de dos variedades de caña de azúcar al estrés osmótico en condiciones *in vitro* e hidroponía**, realizada por el alumno: **Odón Castañeda Castro**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS POR INVESTIGACIÓN

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: \_\_\_\_\_

DR. FERNANDO C. GÓMEZ MERINO

ASESOR: \_\_\_\_\_

DRA. LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ

ASESOR: \_\_\_\_\_

DR. VICTORINO MORALES RAMOS

ASESOR: \_\_\_\_\_

DRA. YOLANDA M. MARTÍNEZ OCAMPO

ASESOR: \_\_\_\_\_

DRA. MARÍA TERESA GONZÁLEZ ARNAO

ASESOR: \_\_\_\_\_

DR. ROBERTO GÁMEZ PASTRANA

Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz. Septiembre de 2014

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es el cultivo más productivo del mundo debido a su mayor eficiencia en la capacidad fotosintética y su habilidad para almacenar sacarosa en el tallo. La caña de azúcar aporta el 75% del azúcar total producido en el mundo. Su alta producción de biomasa y la facilidad de crecimiento hacen de su cultivo uno de los productos agrícolas más interesantes a nivel mundial, útil en alimentos, piensos, y en la generación de insumos para las industrias de bioenergía y químicas. Su cultivo cubre un área de más de 25.4 millones de hectáreas en más de 130 países y territorios, con una producción de más de 1,800 millones de toneladas (FAOSTAT, 2013; Gómez-Merino *et al.*, 2014). La producción promedio mundial es de aproximadamente 80 t ha<sup>-1</sup> (Waclawovsky *et al.*, 2010), y Brasil se ubica como el mayor productor, con 556 millones de toneladas cosechadas el año 2012 (FAO, 2012).

En México, la agroindustria azucarera tiene una larga tradición histórica, y se encuentra espacialmente distribuida en cinco regiones de 15 estados y más de 240 municipios productores. Durante el ciclo 2012/13, en nuestro país se cosecharon 780,300 hectáreas de caña de azúcar, que abastecieron a 55 ingenios azucareros. En las regiones azucareras del país habitan más de 12 millones de personas, y la actividad tiene gran impacto socioeconómico al generar 440,000 empleos directos (DOF, 2014), distribuidos en 165 mil productores de caña, 176 mil trabajadores de campo, 28 mil transportistas, 23 mil obreros sindicalizados, 16 mil en labores administrativas, entre otros. El valor de la producción promedio de esta agroindustria

en las últimas zafas fue de 3 mil millones de dólares que representa el 0.5% del PIB, 2.5% del PIB manufacturero, 11.6% sector primario y 12% sector alimentario (Senties-Herrera *et al.*, 2014). El principal derivado, el azúcar o sacarosa (tipos mascabado, estándar, blanco popular y refinado) tiene un consumo nacional promedio de 5,650,000 toneladas (aproximadamente 47 kg consumo per cápita al año) distribuido en 36.4% industrias de refrescos, jugos y bebidas, 9.6% industrias de confitería, repostería, conservas, enlatados y productos lácteos; 37.1% como consumo directo y el resto en otros usos (CNIAA, 2011).

A escala nacional, el estado de Veracruz concentra más del 40% de la producción azucarera, pero enfrenta diversas problemáticas que ocasionan bajos rendimientos. En el ciclo 2011/2012, la productividad promedio en el estado fue de 61.6 t ha<sup>-1</sup>, lo que representó un descenso de 9 t ha<sup>-1</sup> respecto a promedios anteriores. Causales importantes de estas caídas en la producción tienen su origen en el cambio climático, especialmente relacionado con altas temperaturas, sequías e inundaciones (Aguilar-Rivera, 2012).

El Panel Internacional del Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como un cambio en el estado del clima que resulta de la actividad antropogénica y de la variabilidad natural, que puede identificarse, por ejemplo, empleando pruebas estadísticas, por cambios en la media y/o en la variabilidad de sus características y que persiste durante un periodo prolongado, normalmente décadas o más tiempo (IPCC, 2007).

Hay que destacar que los seis escenarios sobre cambio climático del IPPC han fijado la referencia en torno a la cual trabajan la mayoría de centros de investigación sobre cambio climático en la actualidad.

Ante estas condiciones climáticas, la producción agrícola dependerá cada vez más de la cantidad de agua disponible, y más aún de aquellos que dependan del agua de lluvia, lo que se refleja en mayor volatilidad de los precios de los alimentos que provienen del campo.

La frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos, ya estén relacionados o no con El Niño/La Niña, es un problema contemporáneo de especial importancia para las regiones productoras de caña de azúcar. En México se perciben cada vez temperaturas más elevadas, cercanas o superiores incluso a los 50 °C. En las zonas cañeras de Brasil, se ha presentado una mayor incidencia de sequías, con precipitaciones en 30% por debajo de los valores normales. Debido a estos fenómenos, los rendimientos han caído considerablemente hasta el nivel más bajo en al menos la última década (OIA, 2013; Gómez-Merino *et al.*, 2014).

Con estos antecedentes, existe la percepción generalizada de que el calentamiento global podría aumentar la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos tales como inundaciones y sequías, lo que afecta negativamente la producción de caña de azúcar.

La caña de azúcar es una planta que presenta una amplia variabilidad y una reconocida capacidad de adaptación cuando es sometida a condiciones desfavorables, por falta de agua y salinidad en suelos.

Una precipitación total entre 1,500 y 1,800 mm es adecuada en los meses de crecimiento vegetativo, siempre que la distribución de luz sea apropiada y abundante. Después debe haber un período seco para la maduración. Durante el período de crecimiento activo la lluvia estimula el rápido crecimiento de la caña, la formación y el crecimiento de entrenudos (FAO, 2009). En condiciones adecuadas, el rendimiento se incrementa en proporción directa con la cantidad de agua disponible, y por cada 10 mm de agua utilizada se puede obtener alrededor de 1 t ha<sup>-1</sup> de caña (BSES, 1991), lo que influye directamente en las prácticas de manejo del cultivo.

En la mayor parte del país la temporada de lluvias ocurre durante el verano, por lo que las precipitaciones, y los escurrimientos generados, se concentran en unos cuantos meses del año.

Lo anterior ha implicado la necesidad de construir presas y derivadoras para almacenar y regular los volúmenes escurridos de agua y tenerla disponible para las épocas en que se requiere su aplicación a los cultivos. Por otra parte, en algunas zonas se ha recurrido a la perforación de pozos profundos para obtener el agua requerida para la producción agrícola (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014).

Investigaciones conjuntas en los campos de las ciencias sociales y físicas han demostrado que el sector agrícola en México es particularmente sensible a cambios en la disponibilidad del agua y a los patrones climáticos (Magaña y Conde, 2000).

Esta situación se agravaría aún más con afectaciones en las propiedades de los suelos en cuanto a su capacidad de retención de la humedad. Todo ello comprometería en gran medida la supervivencia de muchas especies que en la actualidad se encuentran ya cercanas al límite de sus posibilidades desde un punto de vista hídrico.

De acuerdo con Rojas-Garcidueñas (2003), aproximadamente la mitad de las comunidades vegetales terrestres sufren regularmente extensos periodos de déficit hídrico. Por ello, en la actualidad, este tipo de estrés constituye la principal causa de pérdidas en el rendimiento de los cultivos económicamente importantes. Incluso, Kramer (1980) ha indicado que en relación con otros factores bióticos y abióticos, la incidencia del estrés hídrico sobrepasa a aquéllos en la gravedad de su efecto.

Por todo ello, en un escenario de cambio climático se requiere emprender acciones encaminadas a contar con germoplasma vegetal adaptado a las condiciones cambiantes. Debido a que la sequía jugará un papel cada vez más determinante en la agricultura global, se requiere poner mayor atención en la búsqueda de fuentes de tolerancia a este tipo de estrés, a fin de disponer del material para obtener variedades con una mayor tolerancia y capacidad de

sobrevivencia (Condon *et al.*, 2004). En general, la industria de la caña de azúcar de todo el mundo está explorando los cultivos biotecnológicos como estrategia de adaptación al cambio climático y a la diversificación productiva (OIA, 2013; Gómez-Merino *et al.*, 2014).

Se han identificado diferentes mecanismos de adaptación a sequía como son la posposición y la reducción del consumo de agua mediante ajustes de la fotosíntesis y la transpiración, reducción del área foliar, así como acumulación de osmoprotectantes como azúcares o aminoácidos libres, principalmente prolina y glicina betaína, lo que permite a las especies desarrollarse en condiciones limitativas de humedad. Por otra parte, cuando la sequía es severa, se observan diferentes desórdenes que incluyen baja tasa fotosintética y respiratoria, cierre de estomas, desintegración de cloroplastos y clorosis, desnaturalización de proteínas y de enzimas como la nitrato reductasa, aumento en el contenido de ácido abscísico y disminución de citocininas, entre otros (Rojas-Garcidueñas, 2003).

En la actualidad una de las posibilidades para obtener variedades tolerantes a la sequía es a través del método de supresión de la irrigación, que comúnmente se utiliza para evaluar la respuesta de las plantas al déficit hídrico. Este método tiene la desventaja de que no toma en consideración la intensidad del déficit de agua en el suelo, que se puede producir a causa de diferencias genotípicas en cuanto al área foliar y desarrollo radical de las mismas. Esto puede llevar a falsas conclusiones respecto a la tolerancia de las variedades a este estrés (Pereira-Irujo *et al.*, 2007),

Por ello, la evaluación por métodos biotecnológicos de la respuesta al déficit hídrico, empleando osmóticos como la adición del polietilén glicol en los medios de cultivo, permitirán contar con una forma de inducir un estrés osmótico homogéneo que sirva para conocer de forma más precisa la respuesta de las plantas a este factor abiótico. Por otro lado, el conocimiento de los mecanismos de resistencia al estrés permitirá alcanzar una más clara comprensión de los procesos implicados en la adaptación de las plantas a un ambiente de déficit hídrico. Hoy en día se sabe que, ante el estrés hídrico, las plantas muestran diferentes estrategias como las basadas en la evasión del efecto de la sequía o en el desarrollo de mecanismos de tolerancia a este estrés abiótico (Levitt, 1980).

Tanto las respuestas fisiológicas como las bioquímicas tienen una base molecular que ha permitido la identificación de *loci de caracteres de cuantitativos* (QTL) en diferentes especies y el aislamiento de genes de tolerancia y resistencia a la sequía. Dentro de estos genes se encuentran los involucrados en la síntesis de osmoprotectantes, de proteínas de la embriogénesis tardía (LEA), de fitohormonas, de factores de transcripción y de proteínas involucradas en la transducción de señales celulares (Amudha y Balasubramani, 2011).

El estrés de sequía ocurre cuando se reduce el agua disponible del suelo, y las condiciones atmosféricas ocasionan una pérdida continua de agua por transpiración y evaporación. El estrés ejerce efectos profundos sobre el crecimiento,

el rendimiento y la calidad de la planta. El primer efecto es la pérdida de turgencia, la que afecta la elongación del tallo, la expansión foliar, la apertura estomática y finalmente un decremento en la tasa de crecimiento (Hale *et al.*, 1987).

Se presentan algunos cambios fisiológicos en la planta como respuesta a la sequía: un incremento en los niveles de ácido abscísico, el cierre de estomas y cambios en la osmolaridad celular.

También, como respuesta al estrés hídrico, se tiene la acumulación de solutos compatibles, como las betaínas, la prolina y los polioles (manitol, sorbitol y pinitol). Éstos actúan como osmolitos citoplásmicos en el ajuste osmótico, aunque también pueden desempeñar otras funciones como el mantenimiento de la estabilidad de macromoléculas y las membranas (Hale *et al.*, 1987).

En condiciones de estrés, la síntesis de proteínas en los tejidos vegetales también puede disminuir, y las proteínas formadas pueden desnaturalizarse y degradarse. Lo primero ocurre debido a que la maquinaria de traducción de ARN mensajeros para el ensamblaje de aminoácidos también sufre daños severos, y los ribosomas se disocian y degradan, lo que impide precisamente que la síntesis de proteínas tenga lugar.

Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit de agua es el crecimiento celular, de manera que la sequía reduce el área foliar y acelera la senescencia de hojas maduras cuando el déficit hídrico es severo. Además, la fotosíntesis y la transpiración se abaten debido a la reducción de la turgencia, al

cierre estomático y al bloqueo a la difusión del CO<sub>2</sub> hacia el mesófilo (Kumar *et al.*, 2011).

Uno de los mecanismos que contribuyen a la resistencia a sequía es el ajuste osmótico, el cual Turner (1997) define como la habilidad de la planta para acumular solutos activamente ante un déficit hídrico. Este mecanismo permite mantener un alto potencial de turgencia, aun con un descenso en el potencial hídrico. Un compuesto que se incrementa en condiciones de sequía es la prolina, aminoácido que se ha encontrado en varias especies (Attipalli *et al.*, 2004), y cuya función ha sido asociada a sostener la turgencia de los tejidos para mantener la función celular (Ramanjulu y Sudhakar, 2000) contra la desecación y actuando como almacén de nitrógeno que será utilizado durante la rehidratación.

La habilidad de sobrevivir en suelos secos está ligada a la posibilidad de sobrevivir a mayor deshidratación. A medida que el suelo se seca y su potencial hídrico decrece, las plantas también deben disminuir su potencial hídrico para mantener un gradiente favorable en el flujo de agua hacia la raíz (Ruiz-Lozano, 2003; Augé *et al.*, 2003).

El ajuste osmótico permite que los tejidos vegetales mantengan un gradiente de potencial hídrico que favorece el flujo del agua en la planta, mejora la turgencia de los tejidos y puede permitir que haya expansión celular y crecimiento; también favorece la apertura de estomas y la fotosíntesis. Los solutos que participan en el ajuste osmótico son iones inorgánicos (principalmente K<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>) o compuestos

orgánicos sin carga (prolina y glicina betaína), así como carbohidratos (sacarosa, pinitol y manitol).

Dado el impacto de la sequía y del incremento de los problemas de salinidad en suelos agrícolas como consecuencia de la elevada evaporación del agua en suelos afectados por altas temperaturas, en este trabajo de investigación doctoral se han postulado dos experimentos a fin de conocer a mayor detalle las respuestas de dos variedades diferentes de caña de azúcar al estrés hídrico y salino, los cuales provocan finalmente estrés osmótico.

Además del déficit hídrico, la caña de azúcar también enfrenta problemas de salinidad derivados precisamente de los altos niveles de extracción de agua del suelo, que ocasionan mayores acumulaciones de sales en las tierras de cultivo.

La caña de azúcar es un cultivo moderadamente sensible a las sales (Flowers, 2004) y se ha sugerido que a valores de conductividad eléctrica (CE) en la pasta saturada sobre los 2 o 3 dS m<sup>-1</sup>, no se afecta el crecimiento y rendimiento de este cultivo, pero que a valores a partir de 7 dS m<sup>-1</sup>, ocurre un 50% de reducción en el crecimiento (Blackburn, 1984). Adicionalmente se han observado diferencias en el grado de tolerancia a las sales, tanto en evaluaciones de campo, como en ensayos de invernadero (Meinzer *et al.*, 1994), siendo escasa la información disponible en cuanto a las causas de ese comportamiento diferencial en comparación con lo que se conoce para otros cultivos.

La salinidad es un factor abiótico de estrés muy importante para el desarrollo de las plantas (Sengupta y Majumder, 2009) y grave problema para la agricultura, especialmente en tierras irrigadas de zonas semiáridas donde del 20 al 30% de los suelos están seriamente dañadas por la sal (FAO, 2002). Altas concentraciones de sal en los suelos disminuyen las cosechas en una gran variedad de plantas en todo el mundo (Gorai y Neffati, 2007).

La tolerancia a la salinidad es por tanto un carácter importante en mejora de plantas que de esta forma incrementarían las cosechas, principalmente para la agricultura que se desarrolla en zonas marginales (Turkan y Demiral, 2009).

Una forma de mejorar los ingresos es mediante el incremento del rendimiento y calidad de la cosecha, lo cual es factible lograr si se emplean técnicas de manejo apropiadas y que a su vez incluya la menor inversión posible respecto a los costos inherentes a su operación. Si lo anterior se cumple, es viable que los resultados positivos de estas actividades se manifiesten a corto plazo, pero si las prácticas agrícolas tienen un impacto nocivo sobre los recursos naturales, a través del tiempo se deteriorará su calidad e inexorablemente afectará la salud de la población y la capacidad productiva de la tierra.

La correcta y oportuna aplicación de fertilizantes es una práctica agrícola que brinda una mejor expectativa sobre la calidad y cantidad de los productos a cosechar. Sin embargo, si no se realiza eficientemente afectará de manera negativa a la producción. Por ello y con el propósito de que el manejo de la fertilización tenga

el efecto esperado, primero se debe contar con una estrategia para detectar y delimitar las variables que afecten tanto al cultivo como a la disponibilidad de los nutrientes (condiciones extremas de acidez o alcalinidad, presencia tóxica de sales solubles u otros elementos químicos, compactación del terreno, áreas con drenaje impedido, entre otros) y proponer en su caso alternativas de solución, porque de lo contrario los nutrientes aplicados tendrán poco o ningún efecto sobre la productividad de las plantaciones. De ahí que ambos experimentos contemplados en esta tesis doctoral exploren el comportamiento de los nutrimentos en respuesta al estrés osmótico.

#### **LITERATURA CITADA**

- Aguilar-Rivera, N. 2012.** Paradigma de la diversificación de la agroindustria azucarera en México. *Convergencia Revista de Ciencias Sociales* 19: 187-213.
- Amudha, J. and Balasubramani G. G.2011.** Recent molecular advances to combat abiotic stress tolerance in crop plants. *Biotechnology and Molecular Biology Review* 6: 31-58.
- Attipalli, R. R., Kolluru V.C. and Munusamy V. 2004.** Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology* 161: 1189-1202.
- Augé, R. M., Moore J. L., Cho K., Stutz J. C., Sylvia D. M., Al-Agely A. and Saxton A. M. 2003.** Relating dehydration resistance of mycorrhizal *Phaseolus vulgaris* to soil and root colonization by hyphae. *Journal of Plant Physiology*160: 1147-1156.

- Blackburn, F. 1984.** Sugarcane. Tropical Agricultural Series. Longman, New York, USA. pp. 47-52.
- BSES. 1991.** The Standard Laboratory Manual for Australian Sugar Mills. Vol. 2, Analytical Methods and Tables. Brisbane, Australia.
- CNIAA. 2011.** Manual Azucarero Mexicano. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera. México, D. F.
- CNPR. Unión Nacional de Cañeros, A.C-CNPR. 2013.** Estadísticas azucareras zafras 1999/2000 a 2011/2012 En: <http://www.caneros.org.mx> (11 mayo 2013).
- Condon, A.G, Richards R. A., Rebetzke G. J., Farquhar G. D. 2004.** Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany* 55: 2447-2460.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2014.** Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2014-2018. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- FAO. 2002.** Fertilizer use by crop. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- FAO. 2009.** The state of world fisheries and aquaculture 2008. Rome, FAO: 76 pp.
- FAO. 2012.** Escasez de alimentos, suministro de alimentos, malnutrición, estado nutricional, sostenibilidad, desarrollo económico y social, agricultura de bajo insumo, y desarrollo sostenible. Roma, Italia. 361.
- FAOSTAT. 2013.** Food and agricultural commodities production. Retrieved from <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=339&lang=en>
- Flowers, T. J. 2004.** Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany* 55: 307-319.

- Gómez-Merino, F.C., Trejo-Téllez L. I. y Senties-Herrera H. 2014.** Innovaciones biotecnológicas en la caña de azúcar para potenciar su uso como biofábrica. Revista ATAM 27: 33-41.
- Gorai, M. and Neffati M. 2007.** Germination responses of *Reaumuria vermiculata* to salinity and temperature. Annals of Applied Biology 151: 53-59.
- Hale, M.G. and Orcutt D.M. 1987.** The physiology of plants under stress. John Willey and Sons. Chichester, UK.
- IPCC.2007.** Synthesis Report. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/mains1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/mains1.html); IPCC: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml#.UWVHUps9qg>.
- Kramer, D., Romheld V., Landsberg E. C. and Marschner H. 1980.** Induction of transfer-cell formation by iron deficiency in the root epidermis of *Helianthus annuus* L. Plant 147: 335-339.
- Kumar, M. C., Varun S. and Kumar S. 2011.** Life cycle assessment of sugar industry: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 3445-3453.
- Levitt. 1980.** Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt and other stresses. Academic Press, New York, NY, USA.
- Magaña, V. and Conde C. 2000.** Climate variability and freshwater resources in northern Mexico. Sonora: a case study. In: Climate and Water: Transboundary Challenges in the Americas. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 373-391.

- Meinzer, F., Plaut Z. and Saliendra N. 1994.** Carbon isotope discrimination, gas exchange and growth of sugarcane cultivars under salinity. *Plant Physiology* 104: 521-526.
- OIA (Organización Internacional del Azúcar). 2013.** Comité de Evaluación del Mercado, Cambio climático y cultivos azucareros Consumo y Estadística. Cambio climático y cultivos azucareros. OIA, Londres, Reino Unido.
- Pereira-Irujo, G., Lechner L. and Aguirrezábal. 2007.** Genetic variability for leaf growth rate and duration under water deficit in sunflower: analysis of responses at cell, organ, and plant level. *Journal of Experimental Botany* 59: 2221-2232.
- Ramanjulu, S. and Sudhakar C. 2000.** Proline metabolism during dehydration in two mulberry genotypes with contrasting drought tolerance. *Journal of Plant Physiology* 157: 81- 85.
- Rojas-Garcidueñas, M. 2003.** La resistencia a la sequía. ISSN 1538-2273. *Ciencia UANL* 7: 326-331.
- Ruiz-Lozano, J. M. 2003.** Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress: new perspectives for molecular studies. *Mycorrhiza* 13: 309-317.
- Sengupta, S. and Majumder A. L. 2009.** *Porteresia coarctata* (Roxb.) Tateoka, a wild rice: a potential model for studying salt-stress biology in rice. *Plant, Cell and Environment* 33: 526-542.
- Sentíes-Herrera, H. E., Gómez-Merino F. C., Valdez-Balero A., Silva-Rojas H. V. and Trejo-Téllez L. I. 2014.** The Agro-Industrial Sugarcane System in

Mexico: Current Status, Challenges and Opportunities. *Journal of Agricultural Science* 6: 27-54.

**Turkan, I, T Demiral. 2009.** Recent developments in understanding salinity tolerance. *Environmental and Experimental Botany* 67: 2-9.

**Turner, S. 1997.** Molecular systematics of oxygenic photosynthetic bacteria. *Plant Systematics and Evolution* 11: 13-52.

**Waclawovsky A. J., Sato P. M., Lembke C. G., Moore P. H., Souza G. M. 2010.** Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal* 8: 263-276.

#### **REFERENCIAS ELECTRÓNICAS**

[1] <http://www.sugarcane crops.com>

[2] <http://www.siazucar.siap.gob.mx>

## **CAPÍTULO 2. RESPUESTAS DE LAS VARIEDADES**

### **Mex 69-290 Y CP 72-2086 A LA SALINIDAD**

#### **RESUMEN**

Se evaluó la respuesta de dos variedades de caña de azúcar (Mex 69-290 y CP 72-2086) al tratamiento con NaCl (0, 50 y 100 mM) en una solución nutritiva en fase de plántula. Los indicadores fueron la concentración y acumulación de sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en vástago, la relación de acumulación entre cationes esenciales respecto a Na y la concentración de prolina. Las variedades evaluadas mostraron respuestas diferenciales, siendo más susceptible a NaCl la Mex 69-290, en función de que los contenidos de cationes esenciales se redujeron en mayor porcentaje y, por tanto, la relación de contenido entre éstos y el Na, además de que en esta variedad se observaron decrementos en la concentración de prolina a medida que se incrementó la concentración de NaCl en la solución nutritiva. La variedad CP 72-2086 mostró mayor tolerancia a NaCl al registrar capacidad de exclusión de Na en vástago, y en consecuencia mantuvo tuvo menor reducción en el contenido de macronutrientes cationes por efecto de NaCl.

**Palabras clave:** K/Na, Ca/Na, Mg/Na, prolina, sodicidad.

## INTRODUCCIÓN

La salinidad es uno de los factores de estrés abiótico que más afecta la producción agrícola y se calcula que más de 800 millones de hectáreas en el mundo presentan algún problema relacionado con sales en el suelo (Munns y Tester, 2008). En México, en 2011, la Comisión Nacional del Agua reportó que 7.3% de los acuíferos presentan problemas de salinidad (CONAGUA, 2011). Ésta dificulta el flujo de agua en las raíces de las plantas, causando estrés osmótico y efectos tóxicos por la acumulación de sodio (Na) y cloro (Cl) en la célula vegetal y, por consiguiente, reducción en la absorción de cationes esenciales (Munns y Tester, 2008), principalmente potasio (K) (García-Morales *et al.*, 2012b).

Se han identificado algunos mecanismos de tolerancia a NaCl en plantas superiores. Por ejemplo, en especies glicófitas tolerantes a esta sal se reduce la acumulación de iones tóxicos como Na y Cl en la parte aérea, en comparación con especies sensibles (Ashraf y Ahmad, 2000). Por otro lado, la acumulación de prolina es frecuentemente reportada en plantas tolerantes a estrés osmótico (Wanek y Richter, 1997). La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo considerado moderadamente sensible a sales y, particularmente al NaCl, lo que afecta su crecimiento y morfología radical, el crecimiento del sistema aéreo, procesos fotosintéticos y el equilibrio en la absorción nutrimental (García y Jáuregui, 2008; García y Medina, 2009).

En el contexto anterior, el objetivo de este estudio fue determinar las respuestas a estrés salino de dos de las variedades de caña de azúcar más

cultivadas en México, considerando como indicadores la concentración y acumulación de K, Ca, Mg y Na,  $(K+Ca+Mg)/Na$  y concentración de prolina en parte aérea de la planta.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación se realizó bajo condiciones de invernadero (tipo cenital, con estructura rectangular, cubierta de plástico calibre 600, con 8 m de ancho, 45 m de largo y 5.7 m de altura). Se usaron vitroplantas de dos meses de edad, aclimatadas en un sustrato consistente en una mezcla de tepetzil y turba (50/50% v/v), con una altura aproximada de 15 cm, de las variedades de caña de azúcar Mex 69-290 y CP 72-2086, provenientes de la Biofábrica Vitromotz, del Ingenio Central Motzorongo, ubicado en el municipio de Acatlán de Pérez Figueroa, Oaxaca.

Las plántulas se establecieron en cultivo hidropónico en la solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1984) a una concentración de 10%, misma que fue complementada con micronutrientes a partir del producto comercial Tradecorp AZ. Las raíces se oxigenaron usando bombas de pecera (Marca Zone) durante 15 minutos en intervalos de 30 minutos. Diez días después del establecimiento del cultivo hidropónico se renovaron las soluciones nutritivas y se les adicionaron 0, 50 y 100 mM de NaCl, teniéndose un total de seis tratamientos resultado de la combinación de las variedades y concentraciones de NaCl, con tres repeticiones y una cubeta de plástico de 3 L<sup>-1</sup> de capacidad con cuatro plántulas como unidad experimental, distribuidas completamente al azar.

Las plántulas se trataron durante 10 días con las soluciones conteniendo NaCl. El pH de las soluciones nutritivas fue ajustado a 5.5 y

éstas se renovaron durante el periodo de tratamientos dos veces (día 0 y día 5 de tratamientos). Después de este periodo, los vástagos de las plántulas fueron secados en estufa de aire forzado (modelo EAAF) durante 48 h a 70 °C y se determinó el peso seco. Las muestras secas se molieron en un molino tipo Wiley y se sometieron a un proceso de digestión con una mezcla de ácido nítrico y perclórico en proporciones 2:1, respectivamente (Alcántar y Sandoval, 1999). En los extractos resultantes se determinaron las concentraciones de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na), usando un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (ICP-ES 725).

Los contenidos de K, Ca, Mg y Na en vástagos de caña de azúcar se obtuvieron con los datos de la concentración nutrimental y los pesos secos del vástago, y con ellos se estimaron las relaciones de contenidos K/Na, Ca/Na y Mg/Na. La concentración de prolina se determinó en material seco, siguiendo la metodología descrita por Bates *et al.* (1973), con lecturas a 520 nm de absorbancia en un espectrofotómetro (Genesys 10 series Spectrophotometer, Thermo Scientific); la prolina fue usada como estándar para la elaboración de la curva de calibración. El experimento se analizó como un factorial (variedad y NaCl) para efectos simples e interacciones entre factores. Los datos obtenidos fueron analizados mediante un ANDEVA con el programa SAS (SAS, 2011) y prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 95%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Concentraciones nutrimentales y de sodio*

En el **Cuadro 1** se presenta la significancia de los efectos principales y de interacción de los factores de estudio en la concentración en vástago de macronutrientes y de sodio. Se observa que sólo existió efecto principal significativo de la concentración de NaCl en la solución nutritiva en la concentración de Ca. Por el contrario, la concentración de Na en vástago fue afectada significativamente por la variedad, concentración de NaCl suministrada y la interacción de estos factores.

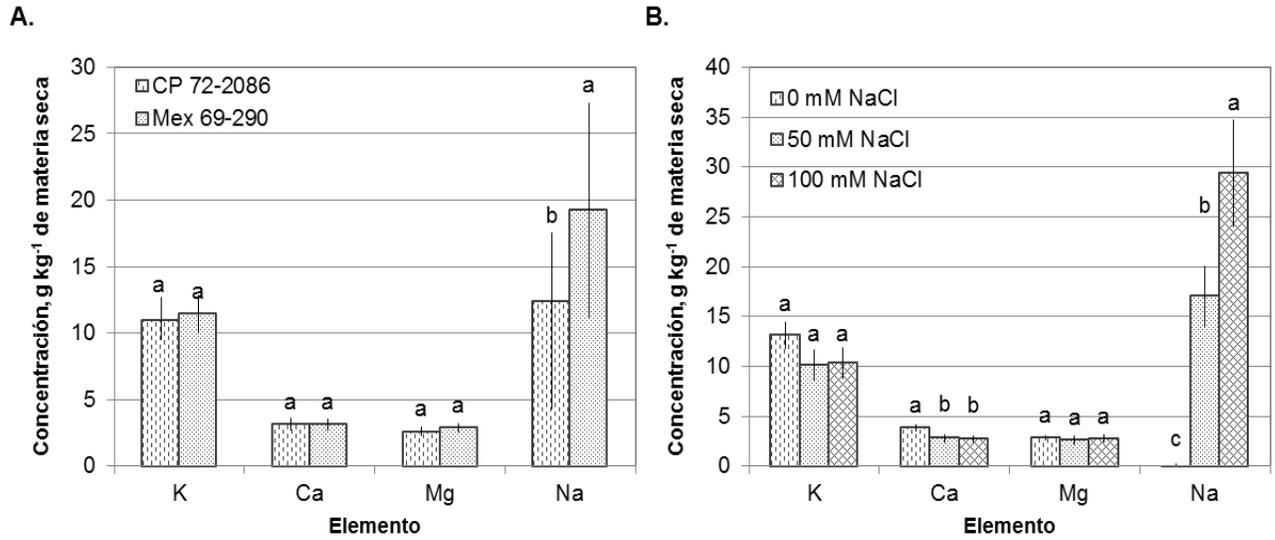
**Cuadro 1.** Efectos de la concentración de NaCl en la solución nutritiva durante 10 días en la concentración de macronutrientes Ca, Mg y K, y de Na, en vástagos de dos variedades de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290).

| Factores de estudio       | Elementos (g kg <sup>-1</sup> de materia seca) |           |           |            |
|---------------------------|--|-----------|-----------|------------|
|                           | Ca   | Mg        | K         | Na         |
| Variedad (V)              | 0.9955 ns                                      | 0.3792 ns | 0.6935 ns | 0.0058 *   |
| Concentración de NaCl (C) | 0.0119 *                                       | 0.8133 ns | 0.1285 ns | < 0.0001 * |
| V X C                     | 0.6160 ns                                      | 0.7302 ns | 0.6547 ns | 0.0203 *   |

\* indica diferencias estadísticas significativas a  $P \leq 0.05$  de acuerdo al análisis de varianza. ns: no significativo.

La concentración de cationes macronutrientes en vástagos de la variedad Mex 69-290, presentó en todos los casos promedios ligeramente superiores a los de la variedad CP 72-2086. No obstante, las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Por otra parte, esta tendencia fue también observada en la concentración de Na, donde la variedad Mex 69-290 fue superior en 55.32% a la variedad CP 72-290 (**Figura 1A**).

Si bien la adición de NaCl a la solución nutritiva ocasionó reducciones ligeras en las concentraciones de K y Mg en vástagos, éstas no fueron estadísticamente significativas. En lo que respecta a la concentración de Ca en vástago, ésta fue reducida significativamente en respuesta a los tratamientos de NaCl probados, y estas reducciones fueron del orden del 27.8 y 29.0% en los tratamientos con 50 y 100 mM de NaCl, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 1B**).



**Figura 1.** Efectos principales de variedad (A) y de concentración de NaCl en la solución nutritiva (B) en la concentración de macronutrientes Ca, Mg y K, y de Na en vástagos de plantas de caña de azúcar.

Medias  $\pm$  DE con letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P=0.05$ ).

Los efectos simples de los factores de estudio son presentados en el **Cuadro 2**, donde destaca la concentración de Na en la variedad Mex 69-290 significativamente menor a la registrada en la variedad CP 72-2086 con la concentración de NaCl más alta adicionada en la solución nutritiva.

**Cuadro 2.** Efectos simples de las variedades y concentraciones de NaCl en la solución nutritiva, en las concentraciones de K, Ca, Mg y Na en vástagos.

| NaCl,<br>mM | Variedad   | K                                  | Ca            | Mg            | Na            |
|-------------|------------|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|             |            | g kg <sup>-1</sup> de materia seca |               |               |               |
| 0           | CP 72-2086 | 13.51 ± 1.23 a                     | 4.06 ± 0.31 a | 2.88 ± 0.26 a | 0.10 ± 0.1 c  |
|             | Mex 69-290 | 12.68 ± 1.59 a                     | 3.65 ± 0.38 a | 2.81 ± 0.28 a | 0.09 ± 0.2 c  |
| 50          | CP 72-2086 | 9.95 ± 1.37 a                      | 2.72 ± 0.33 a | 2.39 ± 0.32 a | 14.83 ± 2.2 b |
|             | Mex 69-290 | 10.27 ± 1.90 a                     | 2.85 ± 0.46 a | 2.82 ± 0.51 a | 19.27 ± 3.7 b |
| 100         | CP 72-2086 | 9.33 ± 2.05 a                      | 2.59 ± 0.49 a | 2.49 ± 0.52 a | 21.29 ± 4.5 b |
|             | Mex 69-290 | 11.36 ± 0.78 a                     | 2.88 ± 0.20 a | 2.96 ± 0.25 a | 37.45 ± 1.9 a |

Medias ± DE con letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P=0.05$ ).

El rango de suficiencia nutrimental de K en caña de azúcar es de 11 a 13 g kg<sup>-1</sup> de materia seca (de Mello-Prado y Caione, 2012). En base a lo anterior, la variedad CP 72-2086 muestra concentraciones deficientes de K con la dosis de Na de 50 y 100 mM; mientras que la variedad Mex 69-290 solo muestra deficiencia de K con el nivel de 50 mM de Na, siendo la concentración de este elemento, ligeramente menor al límite inferior del rango de suficiencia (**Cuadro 2**).

Snyder (1998) reporta que para caña de azúcar, el intervalo de suficiencia de Ca es de 2.8 a 5.0 g kg<sup>-1</sup> de materia seca. Por tanto, las concentraciones de Ca en esta investigación en todos los tratamientos son considerados óptimos. Asimismo, el rango de suficiencia de Mg oscila de 2 a 3 g kg<sup>-1</sup> de materia seca, intervalo dentro del cual se ubican las concentraciones obtenidas en este estudio en todos los tratamientos (**Cuadro 2**).

### ***Acumulación de nutrimentos y sodio***

En el apartado anterior se presentaron los resultados de concentraciones nutrimentales y se compararon con los rangos de suficiencia establecidos para la especie. Adicionalmente resulta interesante calcular el análisis de la acumulación tanto de nutrimentos como de Na, dado que éste considera el peso de materia seca que puede influir en dos sentidos en nutrimentos y sodio, efectos de dilución o de concentración (Trejo-Téllez *et al.*, 2003; Trejo-Téllez *et al.*, 2013b).

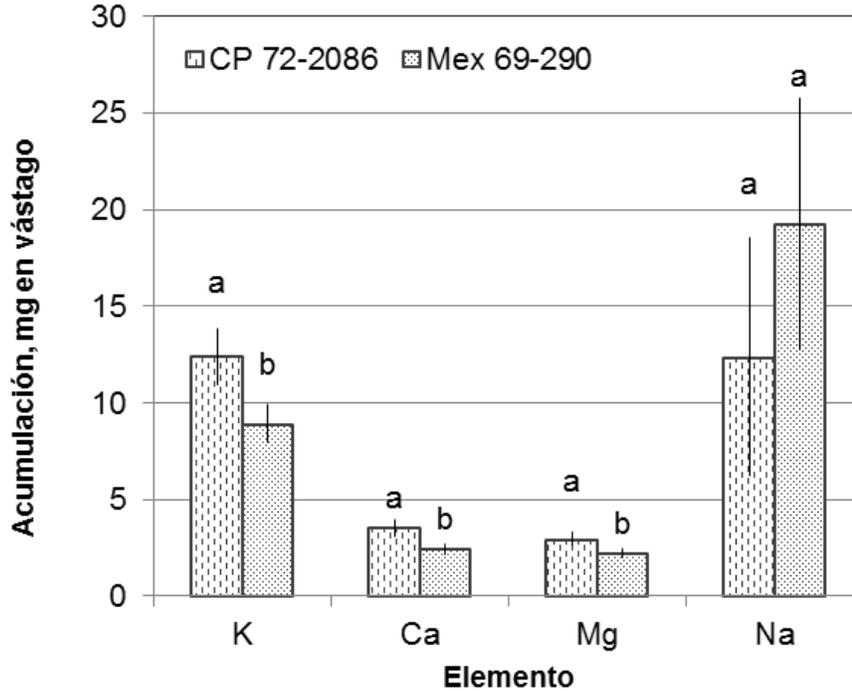
Las acumulaciones de K, Ca y Mg fueron estadísticamente diferentes entre variedades, contrario a lo observado en la acumulación de Na. Con excepción de la acumulación de Mg en vástago, las acumulaciones del resto de macronutrimentos y Na fueron afectadas en forma significativa por la concentración de NaCl adicionada a la solución nutritiva. La interacción de factores de estudio no ocasionó efectos significativos en las acumulaciones evaluados (**Cuadro 3**).

**Cuadro 3.** Efectos de la concentración de NaCl en la solución nutritiva durante 10 días en la acumulación de macronutrientes Ca, Mg y K, y de Na, en vástagos de dos variedades de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290).

| Factores de estudio       | Elementos (g kg <sup>-1</sup> de materia seca) |           |           |            |
|---------------------------|--|-----------|-----------|------------|
|                           | Ca   | Mg        | K         | Na         |
| Variedad (V)              | 0.0001 *                                       | 0.0081 *  | 0.0017 *  | 0.9547 ns  |
| Concentración de NaCl (C) | 0.0022 *                                       | 0.3302 ns | 0.0448 *  | < 0.0001 * |
| V X C                     | 0.7605 ns                                      | 0.9833 ns | 0.6718 ns | 0.2481 ns  |

\* indica diferencias estadísticas significativas, ns: no significativo a  $P \leq 0.05$  de acuerdo al análisis de varianza.

Entre variedades, se observaron diferencias estadísticas significativas en la acumulación de cationes macronutrientes, siendo la variedad CP 72-2086 la que mayores valores presentó para los tres elementos. Por el contrario, la acumulación de Na en vástago no tuvo diferencias estadísticas entre variedades (**Figura 2**). Al comparar estos resultados con los obtenidos en concentración nutricional por efecto de variedad (Figura 1A), se observa efecto de concentración en los elementos K, Ca y Mg en la variedad CP 72-2086, lo que se traduce en mayor peso de biomasa seca en ésta en comparación con la variedad Mex 69-290. No obstante lo anterior, el mayor peso de materia seca de la variedad CP 72-2086 no incrementó la acumulación de Na (**Figura 2**).



**Figura 2.** Efecto principal de variedad en la acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar.

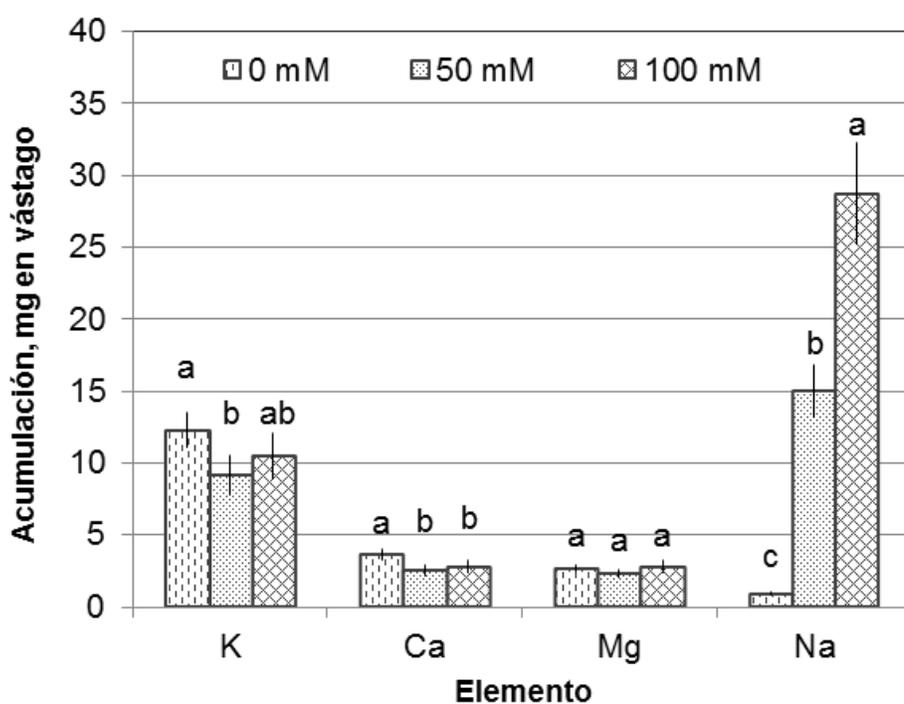
Medias  $\pm$  DE con letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P=0.05$ ).

De manera coincidente a los resultados de las concentraciones nutrimentales de Mg, la acumulación de este nutriente no fue afectada por las distintas concentraciones de NaCl evaluadas. En el caso de los nutrimentos K y Ca, se observó una disminución en la acumulación de éstos en presencia de NaCl en la solución nutritiva (**Figura 3**).

En el caso de la acumulación de Na en vástago, éste guardó una relación positiva con la concentración de NaCl en la solución nutritiva;

registrándose valores medios de 28.73 mg de Na por vástago con el tratamiento consistente en 100 mM NaCl (**Figura 3**).

Por efecto de la concentración de NaCl, las tendencias mostradas en la variables concentración (**Figura 1B**) y acumulación (**Figura 3**) fueron similares.



**Figura 3.** Efecto principal de la concentración de NaCl en la solución nutritiva, en la acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar.

Medias  $\pm$  DE con letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P=0.05$ ).

El **Cuadro 4** presenta los resultados de interacción de los factores de estudio en la acumulación de los macronutrientes K, Ca y Mg, así como de Na. En el caso de los tres primeros, se observan reducciones en la acumulación cuando se adicionó NaCl a la solución nutritiva, independientemente de las concentraciones de sal usadas; sin embargo, estas reducciones no mostraron efectos del factor variedad. Por el contrario, en el caso de la acumulación de Na, se presentan diferencias estadísticas por el factor concentración de NaCl en la solución nutritiva; entre cada concentración de NaCl no se observan diferencias estadísticamente significativas entre variedades.

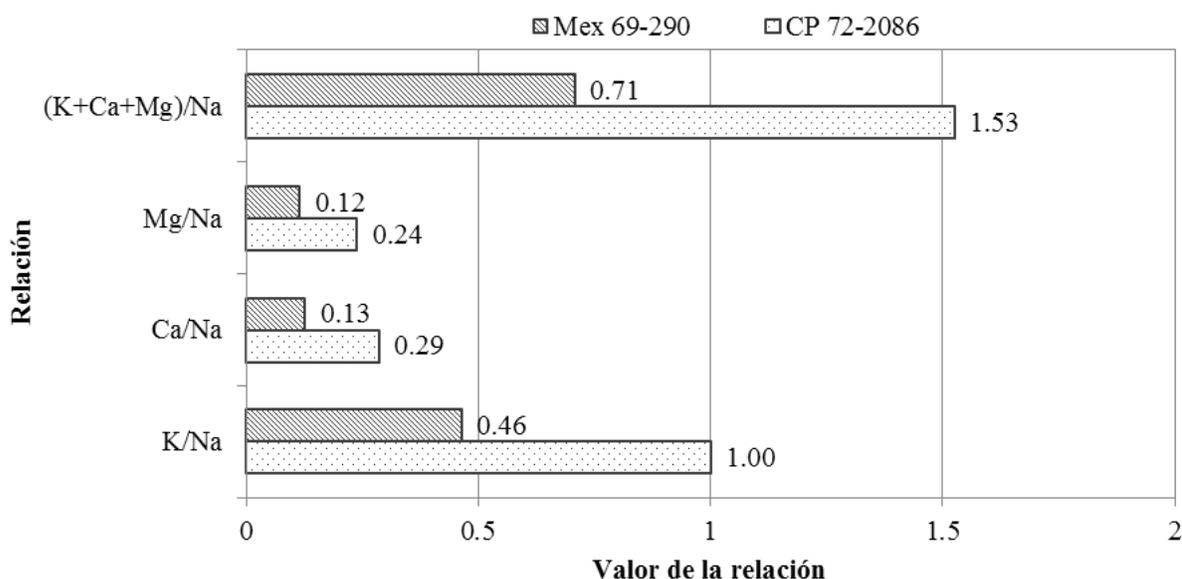
**Cuadro 4.** Efectos simples de las variedades y concentraciones de NaCl en la solución nutritiva, en las acumulaciones de K, Ca, Mg y Na en vástagos de caña de azúcar.

| NaCl,<br>mM | Variedad   | K               | Ca              | Mg            | Na              |
|-------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
|             |            | mg por vástago  |                 |               |                 |
| 0           | CP 72-2086 | 14.22 ± 0.59 a  | 4.29 ± 0.08 a   | 3.03 ± 0.08 a | 1.10 ± 0.04 d   |
|             | Mex 69-290 | 10.41 ± 0.89 ab | 3.00 ± 0.18 bc  | 2.32 ± 0.17 a | 0.80 ± 0.08 d   |
| 50          | CP 72-2086 | 11.33 ± 0.82 ab | 3.11 ± 0.20 abc | 2.73 ± 0.22 a | 16.83 ± 1.44 bc |
|             | Mex 69-290 | 7.03 ± 0.92 b   | 1.97 ± 0.23 c   | 1.94 ± 0.27 a | 13.18 ± 1.82 c  |
| 100         | CP 72-2086 | 11.64 ± 2.31 ab | 3.25 ± 0.56 ab  | 3.12 ± 0.61 a | 26.60 ± 5.09 ab |
|             | Mex 69-290 | 9.34 ± 0.21 ab  | 2.37 ± 0.09 bc  | 2.43 ± 0.13 a | 30.87 ± 0.31 a  |

Medias ± DE con letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P = 0.05$ ).

### **Relaciones de acumulación de nutrimentos respecto a sodio**

Las relaciones de acumulación entre cationes macronutrientes y Na fue siempre superior en la variedad CP 72-2086, respecto a la variedad Mex 69-290, y lo mismo sucedió para la sumatoria de cationes macronutrientes respecto a Na (**Figura 4**). Estas relaciones incluyen los resultados obtenidos con los dos niveles de NaCl y el testigo, lo cual permite afirmar que la variedad CP 72-2086 tiene capacidad de inhibir el transporte de Na a vástago y en consecuencia, la acumulación de cationes macronutrientes en vástagos no es afectada.

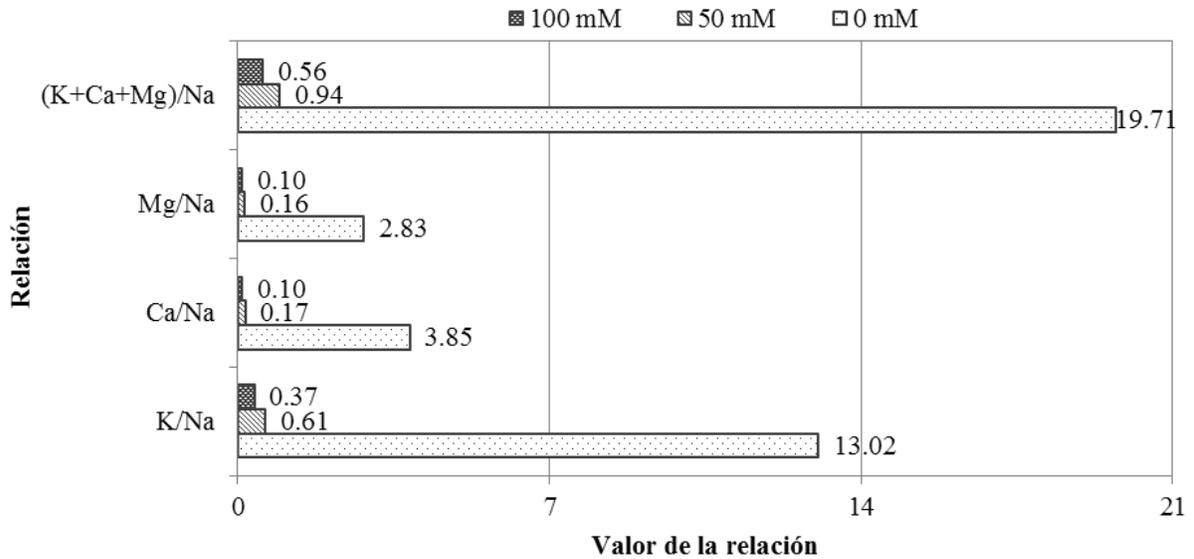


**Figura 4.** Relaciones de acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar en función de la variedad.

Letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P = 0.05$ ).

Tester y Davenport (2003) indican que muchas plantas pueden tolerar el estrés salino mediante la exclusión de Na del vástago o al menos de las hojas, con un consecuente mantenimiento de altos niveles de K. García-Morales *et al.* (2012a) al evaluar la susceptibilidad de variedades de arroz a la salinidad, concluyeron que en la variedad más sensible a la salinidad se redujo la acumulación de K y por tanto también la relación K/Na en vástago se redujo considerablemente. Así también en cempasúchil (*Tagetes erecta* Linn.), se observó capacidad de exclusión de Na de las hojas, al presentarse en éstas los menores valores de concentración y acumulación de este elemento, en comparación con el resto de órganos que constituyen la planta (Trejo-Téllez *et al.*, 2013a).

Las relaciones de acumulación de cationes macronutrientes, de manera individual y conjunta, respecto a sodio, fue reducida en forma considerable a medida que la concentración de NaCl en la solución nutritiva se incrementó (**Figura 5**).



**Figura 5.** Relaciones de acumulación de cationes macronutrientes y de sodio en vástagos de plantas de caña de azúcar, en función de la concentración de NaCl en la solución nutritiva.

Letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P = 0.05$ ).

La relación K/Na se redujo a 2.84 y 4.68% con la adición de 50 y 100 mM de NaCl en la solución nutritiva, en comparación con el testigo, respectivamente. En el caso de la relación Ca/Na, éstas fueron de solo 2.6 y 4.42% de la relación presentada en el testigo, con la aplicación de 50 y 100 mM NaCl. En el caso de la relación Mg/Na, ésta representó un 3.53 y 5.65% de la relación del testigo, cuando se suministraron 50 y 100 mM NaCl a la solución nutritiva (**Figura 5**). En el caso de la relación K/Na, ésta se redujo a 2.84 y 4.68% en comparación con el testigo, con la adición de 50 y 100 mM de NaCl en la solución nutritiva, respectivamente. En el caso de la relación Ca/Na, éstas fueron de solo 2.6 y 4.42% de la relación presentada

en el testigo, con la aplicación de 50 y 100 mM NaCl. En el caso de la relación Mg/Na, ésta representó un 3.53 y 5.65% de la relación del testigo, cuando se suministraron 50 y 100 mM NaCl a la solución nutritiva (**Figura 5**).

Las relaciones de acumulación entre cada uno de los cationes esenciales y Na fueron menores a medida que incrementó la concentración de NaCl en la solución nutritiva, siendo esta disminución de mayor magnitud en la variedad Mex 69-290. Por tanto, esta tendencia se mantiene al considerar los contenidos de K, Ca y Mg de manera conjunta, respecto a Na (**Cuadro 5**).

**Cuadro 5.** Relaciones de acumulación de cationes esenciales respecto a sodio en vástagos de caña de azúcar, en función de la variedad y de la concentración de NaCl en la solución nutritiva.

| NaCl, mM | Variedad de caña | K/Na   | Ca/Na | Mg/Na | (K+Ca+Mg)/Na |
|----------|------------------|--------|-------|-------|--------------|
| 0        | CP 72-2086       | 12.98a | 3.91a | 2.77a | 19.66a       |
|          | Mex 69-290       | 13.08a | 3.77a | 2.92a | 19.77a       |
| 50       | CP 72-2086       | 0.67b  | 0.19b | 0.16b | 1.02b        |
|          | Mex 69-290       | 0.53b  | 0.15b | 0.15b | 0.83b        |
| 100      | CP 72-2086       | 0.44b  | 0.12b | 0.12b | 0.68b        |
|          | Mex 69-290       | 0.30b  | 0.08b | 0.08b | 0.46b        |

Medias  $\pm$  DE con letras iguales en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P = 0.05$ ).

### **Concentración de prolina**

La acumulación de solutos entre los que se encuentra la prolina a nivel celular, ha sido asociada al estrés hídrico y salino, entre otros factores de estrés abiótico del medio (Munns y Tester, 2008; Lu *et al.*, 2009). Esta acumulación incrementa la tolerancia a los factores de estrés antes referidos, al proteger a la planta del potencial osmótico ocasionado por la presencia de sales en exceso (Chen *et al.*, 2007). Contrario a lo antes citado, se observó que las concentraciones de NaCl evaluadas no tuvieron efecto sobre la concentración de prolina, y por el contrario, la concentración foliar de este aminoácido fue diferente estadísticamente entre variedades. Asimismo, la interacción de los factores de estudio tuvo un efecto significativo sobre esta variable (**Cuadro 6**).

**Cuadro 6.** Efectos de la adición de tres niveles de NaCl (0, 50 y 100 mM) en la solución nutritiva durante 10 días en la concentración foliar de prolina de dos variedades de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290).

| Factores de estudio       | Prolina    |
|---------------------------|------------|
| Variedad (V)              | < 0.0001 * |
| Concentración de NaCl (C) | 0.3869 ns  |
| V X C                     | 0.0113 *   |

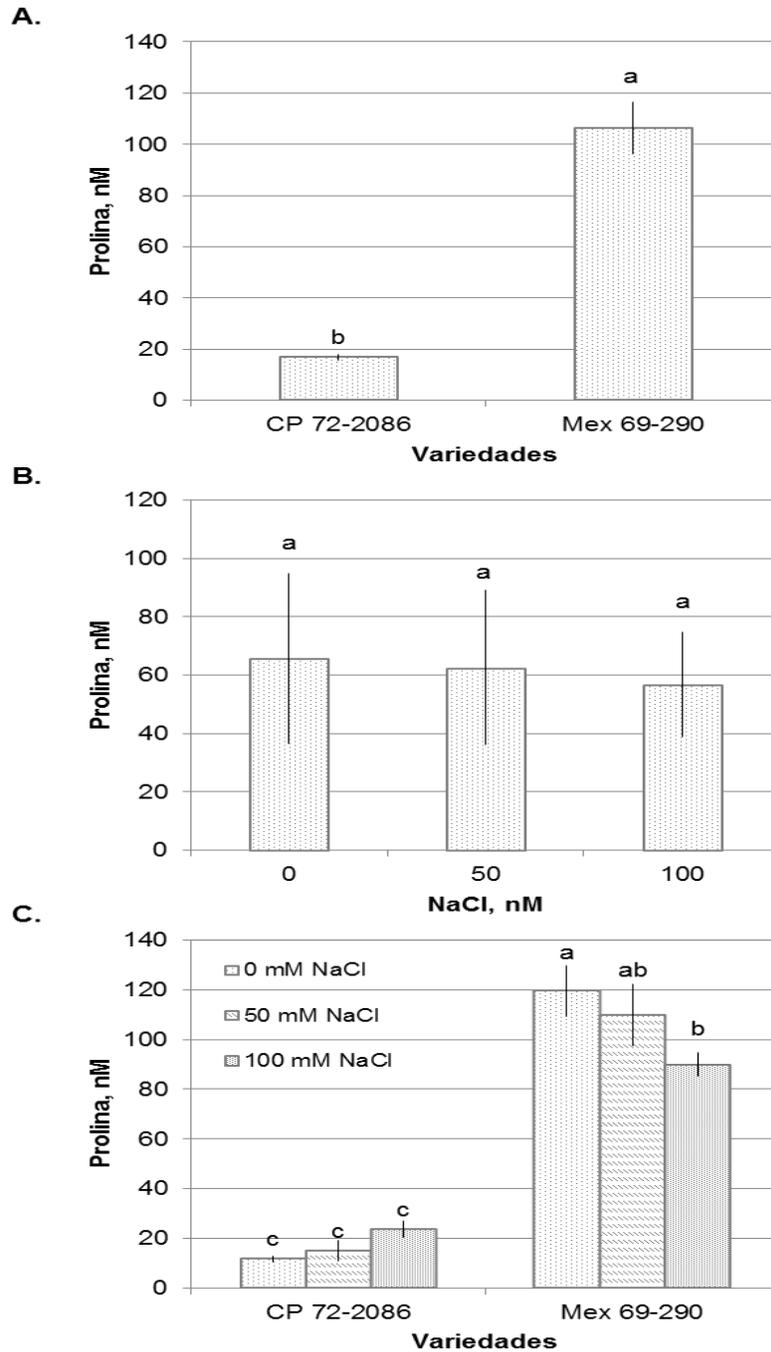
\* indica diferencias estadísticas significativas, ns: no significativo a  $P \leq 0.05$  de acuerdo al análisis de varianza.

En lo que respecta a la concentración de prolina en hoja (**Figura 6A**) en función de la variedad de caña, se observan diferencias sustanciales entre éstas. La variedad Mex 69-290 tiene una concentración de prolina superior en más de seis veces, a la concentración de prolina registrada en la variedad CP 72-2086.

Como se mencionó previamente, las concentraciones de NaCl suministradas a la solución nutritiva, no afectaron significativamente las concentraciones de prolina en hoja; no obstante, se observa una relación inversa entre concentración de prolina y la de NaCl adicionada (**Figura 6B**). Al analizar los resultados de concentración de prolina, es importante considerar por un lado, que ésta es acumulada en algunas células y compartimentos subcelulares particulares. Así también, se ha observado que en plantas transgénicas el efecto de la prolina en el ajuste osmótico a nivel de la planta completa es bajo (Zhu, 2001). Así mismo, es importante considerar que la concentración de prolina es dependiente de su tasa de degradación, catalizada por la enzima piruvato deshidrogenasa activa en mitocondria (Szabados y Savouré, 2009).

La interacción de los factores de estudio ocasionó diferencias estadísticas entre tratamientos, observándose respuestas contrarias entre variedades al tratamiento con NaCl. Por un lado, si bien en la variedad CP 72-2086, la concentración de prolina no fue estadísticamente diferente con los tres niveles de NaCl ensayados, se observan incrementos en ésta del orden

de 28.06 y 100.2%, cuando se adicionó a la solución nutritiva 50 y 100 mM NaCl, respectivamente, en comparación con el testigo (sin NaCl). Por el contrario, en la variedad Mex 69-290 la respuesta es opuesta, ya que la adición de Na en 50 y 100 mM redujo en 8.94 y 24.82% la concentración de prolina, respecto al testigo, lo cual arrojó diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de prolina entre el testigo y el nivel más alto de NaCl evaluado (**Figura 6C**).



**Figura 6.** Efectos principales de variedad (A), de la concentración de NaCl en la solución nutritiva (B) y la interacción de éstos (C) en la concentración foliar de prolina en caña de azúcar.

Medias  $\pm$  DE con letras iguales en cada subfigura indican que no existen diferencias estadísticas significativas ( $P=0.05$ ).

## **CONCLUSIONES**

La variedad CP 72-2086 registró mayor tolerancia a NaCl que la Mex 69-290, al observarse en ésta una menor reducción en las relaciones de acumulación de cationes macronutrientes y sodio. Lo anterior implica que la variedad CP posee mecanismos que le permiten la exclusión de Na. Así también esta variedad tiene incrementos, poco considerables, en la concentración de prolina a medida que la concentración de NaCl aumentó en la solución nutritiva, lo cual sugiere una ligera tolerancia a la salinidad, mientras que la variedad Mex 69-290, presenta concentraciones relativamente altas de este aminoácido mismas que disminuyen al aumentar el estrés salino. Además, en las plantas se genera una acumulación activa de solutos como respuesta de sobrevivencia.

## LITERATURA CITADA

- Alcántar G.G. y Sandoval V. M. 1999.** Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Ashraf M. and Ahmad S. 2000.** Influence of sodium chloride on ion accumulation, yield components and fibre characteristics in salt-tolerant and salt-sensitive lines of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Field Crops Research 66: 115-127.
- Bates L.S., Waldren R. P. and Teare I. D. 1973.** Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil 39: 205-207.
- Chen Z., Cuin T. A., Zhou, M., Twomey A., Naiud B. P. and Shabala S. 2007.** Compatible solute accumulation and stress-mitigation effects in barley genotypes contrasting in their salt tolerance. Journal of Experimental Botany 58: 4245-4255.
- CONAGUA. 2011.** Estadísticas del agua en México-Edición 2011. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México, D. F. 181 p. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF> Consultado: Diciembre, 2013.
- De Mello-Prado R. and Caione G. 2012.** Plant Analysis, Soil Fertility. R. Issaka (Ed.). InTech. DOI: 10.5772/53388. <http://www.intechopen.com/books/soil-fertility/plant-analysis>.
- García M. and Jáuregui D. 2008.** Efecto de la salinización con NaCl o Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sobre la anatomía foliar en dos genotipos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) con tolerancia salina diferencial. Ernstia 18: 89-105.

- García M. and Medina E.E. 2009.** Acumulación de iones y solutos orgánicos en dos genotipos de caña de azúcar, estresados con sales simples o suplementadas con calcio. *Bioagro*. 21:3-14.
- García-Morales S., Trejo-Téllez L. I., Gómez-Merino F.C. Caldana C., Espinosa-Victoria D. and Herrera-Cabrera E. B. 2012a.** Growth, photosynthetic activity, and potassium and sodium concentration in rice plants under salt stress. *Acta Scientiarum Agronomy* 34: 317-324.
- García-Morales S., Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C., Espinosa-Victoria D. 2012b.** Growth inhibition and changes in nutrient accumulation in cucumber plants under salinity conditions. *Acta Horticulturae* 947: 83-90.
- Lu S.Y., Chen C.H., Wang Z.C., Guo Z.F. and Li H.H. 2009.** Physiological responses of somaclonal variants of triploid bermudagrass (*Cynodon transvaalensis* x *Cynodon dactylon*) to drought stress. *Plant Cell Reports* 28: 517-526.
- Munns R., Tester M. 2008.** Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review on Plant Biology* 59: 651-681.
- SAS Institute Inc. 2011.** SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 178 p. Disponible en: <http://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/930/introcom.pdf>.08/11/2013.
- Snyder C.S. 1998.** Plant tissue analysis- A valuable nutrient management tool. News and Views. Potash and Phosphate Institute. GA., USA.
- Steiner A. 1984.** The universal nutrient solution. 633-649. *In*: ISOSC Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. The Netherlands.

- Szabados L. and Savouré A. 2009.** Proline: a multifunctional amino acid. Trends in Plant Science 15: 89-97.
- Tester M. and Davenport R. 2003.** Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants. Annals of Botany 91: 503-527.
- Trejo-Téllez L.I., Rodríguez-Mendoza M.N., Alcántar-González G., Vázquez-Alarcón A. 2003.** Fertilización foliar específica para corregir deficiencias nutrimentales en tres tipos de suelo. Terra Latinoamericana 21: 365-372.
- Trejo-Téllez L.I., Peralta-Sánchez M. G., Gómez-Merino F.C., Rodríguez-Mendoza M.N., Serrato-Cruz M.A., Arévalo-Becerril A.E. 2013a.** Cloruro de sodio sobre biomasa seca y absorción de cationes macronutrientes en cempasúchil (*Tagetes erecta* Linn.). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5: 979-990.
- Trejo-Téllez L.I., Ramírez-Martínez M., Gómez-Merino F.C., García-Albarado J.C., Baca-Castillo G.A., Tejeda-Sartorios O. 2013a.** Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5: 863-876.
- Wanek W., Richter, A. 1997.** Biosynthesis and accumulation of D-ononitol in *Vigna umbellata* in response to drought stress. Plant Physiology 101: 416-424.
- Zhu J.K. 2001.** Plants salt tolerant. Trends in Plant Science 6: 66-71.

**CAPÍTULO 3. OSMOTIC STRESS INDUCED BY POLYETHILEN-GLYCOL  
ALTERS MACRONUTRIENT CONCENTRATION OF  
SUGARCANE PLANTS *in vitro***

**ABSTRACT**

To investigate the effect of osmotic stress on macronutrient concentration in the two most cultivated sugarcane varieties in Mexico (Mex 69-690 [Mex] and CP 72-286 [CP]), 10-day old plantlets were exposed to 0, 3, 6 and 9% polyethylene glycol 6000 (PEG 6000) in liquid growing media, generating osmotic potentials of -0.18, -0.45, -0.60, and -0.80 MPa, respectively. Plants were harvested 20 and 30 days after treatment (dat). Between varieties, and 20 dat, sugarcane plants showed no effect on K, Ca, Mg and S concentrations, while N was lower in CP plants and P diminished in Mex plants. A different response was observed 30-dat with N, K, Ca, Mg and S concentrations higher in Mex plants, while P showed no differences between varieties due to the osmotic stress imposed by PEG. As for the osmotic stress, as PEG concentrations decreased in the nutrient medium, N and Ca concentrations diminished 20 dat, while N and K concentrations were lower 30 dat. Interaction between variety and PEG 6000 concentration showed highly significant effects on most mineral elements, been N and Ca the most affected. In general, Mex plants displayed higher nutrient concentrations.

**KEYWORDS:** Plant nutrition, *Saccharum*, PEG, nitrogen, phosphate, potassium

## INTRODUCTION

The availability of water for crops plays an important role in regulating plant growth and obtaining good yields. Globally, water deficits limit crop productivity more than any other environmental factor, especially for crops such as sugarcane which demand much water and fertilizers.

In Mexico, the sugarcane industry generates more than 2 million jobs, directly and indirectly, and operates in 15 states and 227 municipalities. The 2012-2013 harvest was processed in 55 sugar refineries, from 780,284 ha, crushing 61,438,539 tons of sugarcane to produce 6,974,799 tons of sugar with a value close to \$33 million US dollars, which contributed 11.6% GDP from the primary sector and 2.5% GDP from manufacturing (CONADESUCA, 2013). Mexico is ranked as the seventh largest producer of sugarcane in the world and has shown significant increases in output growth and yield from fields and factories (FAO, 2011; CONADESUCA, 2013). However, in environmental terms, the projections of effects from global climate change on agricultural production in Mexico predict reductions by more than 25% by the year 2080 (Moyer, 2010) if relevant strategic measures are not taken to address this global phenomenon. Drought is a component of climate change that affects agriculture, and therefore studying its effects is advantageous when addressing climate challenges.

Drought causes osmotic stress, which in turn causes loss of cellular turgor, membrane disruption, protein denaturation and production of reactive oxygen

species that lead to oxidative damage. These disorders inhibit photosynthesis, alter metabolism and damage cell structure which, in turn, affects plant growth, reduces fertility and triggers premature senescence processes (Krasensky and Jonak, 2012). The adaptive responses of plants to osmotic stress caused by drought are multiple and are manifested at anatomical, physiological, biochemical and molecular levels (Cominelli *et al.*, 2013). Such processes are genomically regulated by changes in the expression of early response genes such as those involved in signal transduction and transcription factors, and late response genes such as those regulating water transport, osmotic balance, antioxidant systems and damage repair (Huang *et al.*, 2012; Xoconostle-Cázares *et al.*, 2011).

Water constitutes 90% of plant weight such as in sugarcane, and is essential for physiological processes involved in conveying metabolites and nutrients. Therefore, in event of water deficiency, nutrient imbalances can be observed in plant tissues. Although general mechanisms have been identified for drought tolerance in plants, crucial differences have also been detected among species and cultivars as to how they respond to this type of stress; responses which vary according to plant developmental stage and stress duration and intensity. Sugarcane is a crop highly demanding of fertilizers, and little is known about effects from osmotic stress on the absorption and concentration of nutrients in its tissues. In order to modify the osmotic potential of a nutrient solution and thereby induce water stress in a controlled manner, it is common to use polyethylene glycol (PEG), especially in protocols for hydroponics experiments. Because PEG has a large molecular size (6000 or 8000) and does not penetrate plant tissues, it is ideal for generating osmotic stress in

nutrient solutions (Lagerwerff *et al.*, 1961; Money, 1989). In the present study, the concentrations of N, P, K, Ca, Mg and S were analyzed from the stems (stalks) of sugarcane varieties Mex 79-290 (Mex) and CP 72-2086 (CP) in response to water stress caused by the application of PEG 6000 in nutritive solution *in vitro*.

## **MATERIALS AND METHODS**

### **Plant material and growing medium**

Seedlings from varieties Mex 79-290 and CP 72-2086 were used for *in vitro* culture on MS medium (Murashige and Skoog, 1962) at 100%, and supplemented with 2% sucrose (w/v), myo- inositol (100 mg/L), thiamine (50 mg/L), pyridoxine (100 mg/L), niacin (50 mg/L), glycine (300 mg/L), biotin (100 mg/L), arginine (50 mg/L) and ascorbic acid (50 mg/L). The pH of the medium was adjusted to  $5.7 \pm 0.1$  and remained in a liquid state throughout the experiment. The liquid culture medium was placed in 500 mL flasks, each flask containing 50 mL of MS medium, and then sterilized in an autoclave (Lab-Tech Model LAC5060s, South Korea) at 120 °C for 20 min.

### **Treatments and experimental conditions**

Four concentrations of polyethylene glycol 6000 were used to induce water stress in the culture medium: 0, 3, 6 and 9% (P/W), generating osmotic potentials equivalent to -0.18, -0.45, -0.65 and -0.80 MPa, respectively. The osmotic potentials were monitored with a cryoscopic osmometer (Osmomat-030, Gonotec GmbH, Berlin, Germany). Each treatment had five replicates and each replicate consisted of a 500 mL flask containing 50 mL of culture medium and three seedlings of each variety in each jar. Seedlings were maintained in growth chambers under controlled conditions of 16 h light, 25 °C and 75% relative humidity.

## **Nutrient analyses**

After 20 and 30 days of establishment in the liquid culture medium having different levels of PEG, the plants were extracted to analyze tissue nutrient content. Plants were dried at 72 °C for 48 h in a forced air oven. Once dry, the samples were finely ground using a Thomas-Wiley Laboratory Mill with a 1.0 mm sieve (Model 4, Philadelphia, PA, USA). Nitrogen concentrations were determined using the Semi-micro Kjeldahl method (Bremner, 1965), whereas the other macronutrients were determined using wet digestion of the dried material with a mixture of nitric and perchloric acids (Alcántar and Sandoval, 1999). Readings of the extracts, obtained after digestion and filtration, were made using an inductively-coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-ES VARIAN™ 725, Melbourne, Australia).

## **Experimental design and statistical analysis**

Treatments were arranged in a completely randomized design. Factors studied included 1) the concentration of PEG 6000 (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Germany) in cultivation medium (0, 3, 6 and 9%, w/v) and 2) the varieties of sugarcane (Mex 69-290 and CP 72-2086). The data were analyzed using analyses of variance and the Tukey means comparison test ( $\alpha=0.05$ ) using the Statistical Analysis System (SAS, 2011).

## RESULTS AND DISCUSSION

Since its discovery as an efficient osmotic stressor (Lagerwerff *et al.*, 1961), polyethylene glycol (PEG) has been widely used to induce controlled water deficits in plants using appropriate experimental protocols (Caruso *et al.*, 2007; Ehlert *et al.*, 2011; Labanowska *et al.*, 2013; Uzilday *et al.*, 2014). Its immobility and lack of toxicity to plant cells make PEG an osmolite suitable for plant physiological studies (Al-Bahrany, 2002). Furthermore, as it does not react with other chemical and biological substances, PEG is known as the most applicable substance for experimentally inducing biological osmotic pressure (Macar *et al.*, 2009).

In the present study, PEG altered osmotic pressure in the liquid nutrient medium, dropping it from -0.18 MPa in the control (containers containing 0.0% PEG 6000) to -0.80 MPa in containers with 9% PEG 6000. This decrease in osmotic potential resulted in altered nutrient uptake and concentration in sugarcane plants. **Table 1** shows the effect of PEG concentration, sugarcane variety and their interactions on the concentrations of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S) in sugarcane plants. Significant ( $P \leq 0.001$ ) effects from PEG concentrations, sugarcane varieties and their interactions on N concentrations were observed in sugarcane plants 30 days after treatment (dat). Furthermore, significant effects ( $P \leq 0.05$ ) from PEG concentrations were observed on K and Ca concentrations in sugarcane plants 20 dat. Sugarcane variety significantly affected ( $P \leq 0.05$ ) N, K, Mg and S concentrations 20 dat, and the concentrations of Ca ( $P \leq 0.001$ ), apart from

N. The interactions between PEG concentration and sugarcane variety were significant for P and K at 20 dat, and for N at 30 dat.

**Table 1.** Effect of PEG concentration in the nutrient solution, variety and the interactions among both factors on the concentration of macronutrient in sugarcane plants *in vitro* under osmotic stress induced by PEG 6000 20 and 30 days after treatment.

| Source of variation                | Degrees of freedom | Days after treatment |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------------|--------------------|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                    |                    | N                    |    | P  |    | K  |    | Ca |    | Mg |    | S  |    |    |
|                                    |                    | 20                   | 30 | 20 | 30 | 20 | 30 | 20 | 30 | 20 | 30 | 20 | 30 |    |
| Polyethylene glycol level<br>[PEG] | 3                  | ns                   | ** | ns | ns | ns | *  | *  | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Variety (VAR)                      | 1                  | *                    | ** | ns | ns | ns | *  | ns | ** | *  | *  | *  | *  | *  |
| Interaction [PEG] X (VAR)          | 3                  | ns                   | ** | *  | ns | *  | ns |

ns: no significant; \*: significant at  $P \leq 0.05$ ; \*\* highly significant at  $P \leq 0.001$ .

In general, Mex 69-290 has higher macronutrient concentrations ( $P \leq 0.05$ ) (**Table 2**). Nitrogen and magnesium concentrations were higher in this variety at 20 and 30 dat, while K, Ca and S changed only at 30 dat. Variety CP 72-2086 showed higher P concentrations at 20 dat, although at 30 dat both varieties displayed the same P concentrations. These differences arise because there is a higher nutrient abatement to 30 than 20 dat.

When analyzing the effect of PEG concentration as an independent factor, N concentrations decreased in sugarcane plants at 20 and 30 dat with increased PEG concentration in the nutrient medium (**Table 3**). As well, K concentrations in plants decreased with concentrations of PEG in the nutrient medium only at 30 dat, while that for Ca decreased at 20 dat. All other nutrient concentrations did not change in response to the treatments tested.

**Table 2.** Effect of the factor **variety** on the concentration of macronutrients of sugarcane plants under osmotic stress induced by PEG 6000 *in vitro* 20 and 30 days after treatment.

| Variety    | N                     |       | P    |      | K     |      | Ca   |      | Mg   |      | S    |      |
|------------|-----------------------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | (g/kg <sup>-1</sup> ) |       |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |
|            | Days after treatment  |       |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |
|            | 20                    | 30    | 20   | 30   | 20    | 30   | 20   | 30   | 20   | 30   | 20   | 30   |
| Mex 79-290 | 10.9a                 | 14.3a | 2.8b | 1.1a | 26.7a | 2.2a | 2.8a | 0.7a | 1.8a | 0.5a | 3.4a | 1.1a |
| CP 72-2086 | 7.9b                  | 8.9b  | 3.2a | 1.1a | 23.5a | 1.1b | 2.3a | 0.3b | 1.4b | 0.3b | 3.1a | 0.8b |

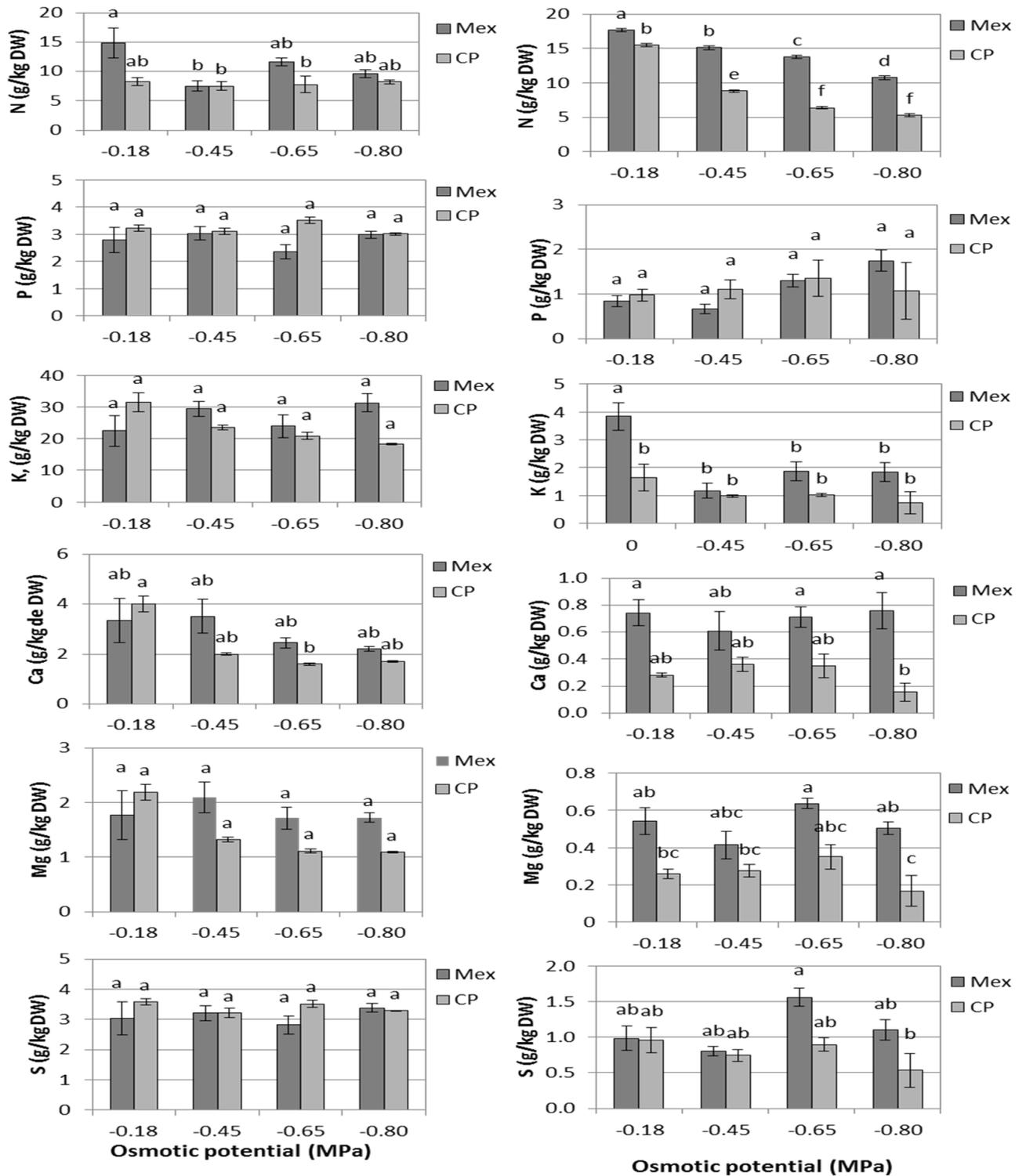
Distinct letters on the same column indicate statistical differences ( $P \leq 0.05$ ) between varieties.

**Table 3.** Effect of the factor **PEG** concentration on the content of macronutrients of sugarcane plants under osmotic stress induced by PEG 6000 *in vitro* 20 and 30 days after treatment.

| PEG concentration in the<br>nutrient medium (%; p/w) | (g/kg <sup>-1</sup> ) |       |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |
|--|-----------------------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|
|  | N                     |       | P    |      | K     |      | Ca    |      | Mg   |      | S    |      |
|  | Days after treatment  |       |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |
|  | 20                    | 30    | 20   | 30   | 20    | 30   | 20    | 30   | 20   | 30   | 20   | 30   |
| 0  | 16.6a                 | 11.5a | 3.0a | 0.9a | 26.9a | 2.7a | 3.6a  | 0.5a | 1.9a | 0.4a | 3.3a | 0.9a |
| 3  | 11.9b                 | 7.5b  | 3.0a | 0.8a | 26.4a | 1.0b | 2.7ab | 0.5a | 1.7a | 0.3a | 3.2a | 0.7a |
| 6  | 10.1c                 | 9.6ab | 2.9a | 1.3a | 22.3a | 1.4b | 2.0b  | 0.4a | 1.4a | 0.5a | 3.2a | 1.2a |
| 9  | 8.0d                  | 8.9ab | 2.9a | 1.4a | 24.8a | 1.2b | 1.9b  | 0.4a | 1.4a | 0.3a | 3.3a | 0.8a |

Distinct letters on the same column indicate statistical differences ( $P \leq 0.05$ ) among PEG concentrations in the nutrient medium.

**Figure 1** depicts the behavior of each macronutrient in both sugarcane varieties in response to osmotic stress induced by PEG 6000. Differences were most evident at 30 dat, especially for K, Mg and S concentrations. Nitrogen concentrations were significantly different at 20 and 30 dat, but were most evident at 30 dat, especially for CP 72-286 plants. No significant effects were observed for P at 20 or 30 dat, although a tendency for increased levels was observed at 30 dat, especially in Mex 79-290 plants. Potassium concentrations were not affected at 20 dat, but were significantly reduced 30 dat. Calcium was significantly reduced at 20 dat in both varieties, whereas CP plants showed significant effects at 30 dat. Similarly, Mg concentrations were significantly reduced at 30 dat, and CP plants were more affected. Finally, S concentrations were not affected by altered osmotic potentials in either variety at 20 dat, although a reduction was evident at 30 dat in CP plants.



**Figure 1.** Macronutrient concentration in sugarcane Mex 79-290 and CP 72-2086 plants 20 (left side) and 30 (right side) days after PEG 6000 treatment. Distinct letters on the columns of subfigure indicate statistical differences among treatments ( $P \leq 0.05$ ).

To our understanding, this is the first study reporting the effects of osmotic stress induced by PEG on sugarcane macronutrient concentrations *in vitro*. Importantly, N and Ca concentrations were significantly affected by PEG treatments under our experimental conditions. Nitrogen is a primary plant nutrient that is highly important in achieving maximum crop productivity and plants absorb N in greater amounts than any other essential nutrient because this mineral element is a crucial component of all enzymes and other vital molecules such as chlorophylls and nucleic acids. Thus, N is necessary for plant growth, development and performance. As N uptake, biomass production, yield and sugar production are strongly correlated, the N requirement of sugarcane is large and must be in balance with other nutrients, especially if plants are exposed to environmental stressors such as drought (Bäzinger *et al.*, 2000). Villar-Salvador *et al.* (2013) reported that maintaining a low N content allows plants experiencing water stress to overcome such events. Nitrogen, as ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) and nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) have different effects on gas exchange parameters (Guo *et al.*, 2007). Zhang *et al.* (2011) reported that increased  $\text{NO}_3^-$  nutrition plays a favored anti-oxidative metabolic role, compared with  $\text{NH}_4^+$  nutrition in plants, thereby increasing tolerance to drought-related stress. Such mechanisms are essential for tolerance to water stress, acting on N metabolism as well as helping to maintain or augment biomass. In the present study, the MS medium contained high concentrations of ammonium and nitrate (i.e., 39.5 mM of  $\text{NO}_3^-$  and 20.5 mM of  $\text{NH}_4^+$ ) (Bensaddek *et al.*, 2001). However, sugarcane strongly prefers ammonium over nitrate (Robinson *et al.*, 2011), which could explain the lower N contents observed in our sugarcane plants (an average of 11.6 g/kg DW) in

comparison to a sufficient leaf N range reported by McCray and Mylavarapu (2005) of 20 to 23 g/kg DW.

Calcium plays an essential role in the structural and functional integrity of plant membranes and other structures. However, in drought-stressed plants, a decrease of nearly 50% in leaf  $\text{Ca}^{2+}$  has been reported (Lisar *et al.*, 2012). Wu *et al.* (2012) reported that soil water shortages can decrease root hydraulic conductivity and affect Ca uptake and movement throughout the plant. Osmotic stress induced by 10% PEG 6000 significantly decreased cortical cell volume, and application of additional  $\text{Ca}^{2+}$  regulated the expression and activity levels of aquaporins according to water availability, which contributed to optimized water use. Abdalla and El-Khoshiban (2007) reported calcium reductions in wheat plants under drought-related stress, as did Akhondi *et al.* (2006) for shoots of *Medicago sativa*, and Hu *et al.* (2007) in maize, and is consistent with our results.

## **CONCLUSIONS**

We conclude that osmotic stress induced by PEG differentially affects macronutrient concentrations in sugarcane *in vitro*, with N and Ca more affected than the other nutrients studied. Furthermore, we found different responses between varieties, with Mex 79-290 plants having higher nutrient concentrations and therefore better performance.

## REFERENCES

- Abdalla M.M., El-Khoshiban N.H. 2007:** The influence of water stress on growth, relative water content, photosynthetic pigments, some metabolic and hormonal contents of two *Triticum aestivum* cultivars. *Journal of Applied Sciences Research* 3: 2062-2074.
- Akhondi M., Safarnejad A., Lahouti M. 2006:** Effect of drought stress on proline accumulation and mineral nutrients changes in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences* 10: 165-175.
- Al-Bahrany A.M. 2002.** Callus growth and proline accumulation in response to polyethylene glycol induced osmotic stress in rice *Oryza sativa*. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 5: 1294-1296.
- Alcántar G.G., Sandoval M.V. 1999.** Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial. Núm. 10. SMCS. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 150 p.
- Bäzinger M., Edmeades G.O., Beck D., Bellon M. 2000.** Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice. CIMMYT, Mexico City, Mexico. 68 p.
- Bensaddek L., Gillet M., Nava-Saucedo J.E., Fliniaux M.A. 2001.** The effect of nitrate and ammonium concentrations on growth and alkaloid accumulation of *Atropa belladonna* hairy roots. *Journal of Biotechnology* 85: 35-40.
- Bremner J.M. 1965.** Total nitrogen. *In:* Black C.A. (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. pp. 1149-1178.

- Caruso A., Cheddor F., Carpin S., Depierreux C., Delmotte F.M., Kahlem G., Morabito D. 2007.** Physiological characterization and identification of genes differentially expressed in response to drought induced by PEG 6000 in *Populus canadensis* leaves. *Journal of Plant Physiology* 165: 932-941.
- Cominelli E., Conti L., Tonelli C., Galbiati M. 2013.** Challenges and perspectives to improve crop drought and salinity tolerance. *Nature Biotechnology* 30: 355-361.
- CONADESUCA. 2013.** Cifras de Cierre de Superficie Cosechada, y de Producción de Caña y Azúcar, Zafra 2012/13. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. México. D.F. Available at: [www.infocana.gob.mx/mos\\_boletin.php?id=212](http://www.infocana.gob.mx/mos_boletin.php?id=212).
- Ehlert C., Plassard C., Cookson S.J., Tardieu F., Simonneau T. 2011.** Do pH changes in the leaf apoplast contribute to rapid inhibition of leaf elongation rate by water stress? Comparison of stress responses induced by polyethylene glycol and down-regulation of root hydraulic conductivity. *Plant, Cell and Environment* 34: 1258-1266.
- FAO. 2011.** Food and agricultural commodities production. Sugar cane production. Countries by commodities. Available at: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
- Guo S., Kaldenhoff R., Uehlein N., Sattelmacher B., Brück H. 2007.** Relationship between water and nitrogen uptake in nitrate- and ammonium-supplied *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170: 73-80.

- Hu Y., Burucs Z., Tucher S., Schmidhalter U. 2007.** Short-term effects of drought and salinity on mineral nutrient distribution along growing leaves of maize seedlings. *Environmental and Experimental Botany* 60: 268-275.
- Huang G.T., Ma S.L., Bai L.P., Zhang L., Ma H., Jia P., Liu J., Zhong M., Guo Z.F. 2012.** Signal transduction during cold, salt, and drought stresses in plants. *Molecular Biology and Reproduction* 39: 969-987.
- Krasensky J., Jonak C. 2012.** Drought, salt, and temperature stress-induced metabolic rearrangements and regulatory networks. *Journal of Experimental Botany*, doi: 10.1093/jxb/err460.
- Labanowska M., Filek M., Kurdziel M., Bidzińska E., Miszalski Z., Hartikainen H. 2013.** EPR spectroscopy as a tool for investigation of differences in radical status in wheat plants of various tolerances to osmotic stress induced by NaCl and PEG-treatment. *Journal of Plant Physiology* 170: 136-145.
- Lagerwerff J.V., Ogata G., Eagle H.E. 1961.** Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol. *Science* 133: 1486-1487.
- Lisar S.Y.S., Motafakkerazad R., Hossain M.M., Rahman I.M.M. 2012.** Water stress in plants: causes, effects and responses. *In: Ismail Md. Mofizur Rahman (Ed.), Water Stress*, ISBN: 978-953-307-963-9, InTech, Available at <http://www.intechopen.com/books/water-stress/water-stress-inplants-causes-effects-and-responses>
- Macar T.K., Turan O., Ekmekci Y. 2009.** Effects of water deficit induced by PEG and NaCl on chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars and lines at early seedling stages. *G.U. Journal of Science* 22: 5-14.

- McCray J.M., Mylavarapu R. 2005.** Sugarcane Nutrient Management Using Leaf Analysis. University of Florida, IFAS Extension, SS-AGR-335. Available at: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/AG/AG34500.pdf>.
- Money N.P. 1989.** Osmotic pressure of aqueous polyethylene glycols. Relationship between molecular weight and vapor pressure deficit. *Plant Physiology* 91: 766-769.
- Moyer M. 2010.** How much is left? A graphical accounting of the limits to what one planet can provide. *Scientific American – Environment*. September 2010: 74-81.
- Murashige T., Skoog F.A. 1962.** A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum* 15: 473-497.
- Robinson N., Brackin R., Vinall K., Soper F., Holst J., Gamage H., Paungfoo-Lonhienne C., Rennenberg H., Lakshmanan P., Schmidt S. 2011.** Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. *PLoS ONE* 6: e19045.
- SAS (Statistical Analysis System). 2011.** SAS user's guide. Statistics. Version 9.3. SAS Inst., Cary, NC, United States.
- Uzilday B., Turkan I., Ozgur R., Sekmen A.H. 2014.** Strategies of ROS regulation and antioxidant defense during transition from C3 to C4 photosynthesis in the genus *Flaveria* under PEG-induced osmotic stress. *Journal of Plant Physiology* 171: 65-75
- Villar-Salvador P., Peñuelas J.L., Jacobs D.F. 2013.** Nitrogen nutrition and drought hardening exert opposite effects on the stress tolerance of *Pinus pinea* L. seedlings. *Tree Physiology* 33: 221-32.

**Wu Y., Liu X., Wang W., Zhang S., Xu B. 2012.** Calcium regulates the cell-to-cell water flow pathway in maize roots during variable water conditions. *Plant Physiology and Biochemistry* 58: 212-219.

**Xoconostle-Cázares B., Ramírez-Ortega F.A., Flores-Elenes L., Ruiz-Medrano R. 2011.** Drought tolerance in crop plants. *American Journal of Plant Physiology* 5: 241-256.

**Zhang L., Wang K., Zhang X., Lu L., Li Y., Gao M., Wang C., Hu J., Liang Z. 2011.** Role of nitrate nutrition in alleviation of the adverse effects of drought stress on maize cultivars: biomass production and antioxidative capacity. *Pakistan Journal of Botany* 43: 2869-2874.

## **CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES GENERALES**

- La caña de azúcar es una especie que presenta sensibilidad diferencial entre variedades, a factores causantes de estrés osmótico como son la salinidad y la sequía.
- La variedad CP 72-2086 mostró mayor tolerancia al estrés salino causado por NaCl. Esta mayor tolerancia es atribuida a la capacidad observada para inhibir el transporte de Na a parte aérea, mecanismo conocido como exclusión de Na. Asimismo, la acumulación de cationes esenciales como potasio, calcio y magnesio en vástagos, no es afectada por el tratamiento con NaCl en esta variedad.
- El estrés salino no se tradujo en acumulación significativa de prolina, aunque en la variedad CP 72-2086 se observó un ligero incremento. Por el contrario, la acumulación de este amino ácido mostró una reducción significativa en la variedad Mex 69-290 con el aumento en la concentración de NaCl en la solución nutritiva haciendo de ésta última una variedad poco tolerante a la salinidad.
- Los nutrimentos mayormente afectados por el estrés hídrico inducido artificialmente por la adición de PEG 6000 fueron el N y el Ca.

- En el caso del experimento por estrés hídrico, la variedad Mex 69-290 mostró mayor tolerancia a la adición de polietilenglicol al medio de crecimiento, al presentar esta variedad mayores acumulaciones nutrimentales y crecimiento, en comparación con la variedad CP 72-2086.
- La concentración y acumulación de nutrimentos son indicadores adecuados para evaluar la tolerancia a factores de estrés salino e hídrico en caña de azúcar.
- Si bien ambos factores estudiados, salinidad y sequía, ocasionan estrés osmótico en la planta, la tolerancia a éstos entre las variedades no es la misma.
- Se presume que los mecanismos de respuesta a salinidad y sequía son distintos en la caña de azúcar y la activación de éstos, diferente entre variedades.

## RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

- Realizar experimentación sobre salinidad y sequía en campo, en etapas fenológicas posteriores a las que se realizaron en los estudios presentados en esta tesis.
- Contrastar los efectos observados en cultivo *in vitro* y en invernadero, con aquellos obtenidos en campo en las mismas fases fenológicas.
- Evaluar los efectos que salinidad y sequía tienen en otras fases fenológicas de la caña de azúcar.
- Valorar los efectos que factores de estrés osmótico tienen en rendimiento y calidad de caña de azúcar.
- Realizar estudios moleculares que permitan identificar genes y proteínas involucradas en la regulación de respuestas a salinidad y sequía.

## ANEXO

### CURRÍCULUM VITAE ODÓN CASTAÑEDA CASTRO

#### Datos Personales

Nombre completo: Odón Castañeda Castro

Nacionalidad: Mexicano

Trabajo actual: Académico-Universidad Veracruzana

Jornada: 40 horas semanales

Adscrito: Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana

Email: odcastaneda@uv.mx

#### Formación Académica

Químico Agrícola, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana, México, 2001.

Maestría en Caña de Azúcar. Universidad Veracruzana. México. 2007.

Estudiante de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Campus Córdoba.

#### Actividades de Investigación

##### *Artículos científicos*

**Castañeda-Castro O.**, Gómez-Merino F. C., Trejo-Téllez L. I., Morales-Ramos V., González-Arno M. T., Martínez-Ocampo Y. M., Gámez-Pastrana R., y Pastelín-Solano M. C. 2014. Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales en caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Revista Agroproductividad* 7 (2): 6-21.

**Castañeda-Castro O.**, Trejo-Téllez L. I., Gómez-Merino F. C., Jácome-Ortiz L., Hernández-De la luz H., Morales-Ramos V., González-Arno M. T., Martínez-Ocampo Y. M., Gámez-Pastrana R., y Pastelín-Solano M. C. 2014. Respuestas de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) a la salinidad. *Revista Agroproductividad* 7 (2): 55-59.

**Castañeda-Castro O.**, Gómez-Merino F. C., Trejo-Téllez L. I., Morales-Ramos V., González-Arno M. T., Martínez-Ocampo Y. M., Gámez-Pastrana R. 2014. Osmotic stress induced by polyethilen-glycol alters macronutrient concentration of sugarcane plants *in vitro*. *Plant, Soil and Environment* (Enviado).

Enlargement and rooting of peruvian cherry (*Physalis peruviana* L.) vitroplantas. Martínez-Montiel, O., Pastelín-Solano M. C., Ventura-Zapata E., **Castañeda-Castro O.**, González-Arno M. T., Guevara-Valencia M., Luna-González A., y Díaz-Ramos C. 2011. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* Vol. 13. No. 3.

**Castañeda-Castro O.**, Gómez-Merino F. C., Trejo-Téllez L. I., Pastelín-Solano M. C., Martínez-Ocampo Y. M., Guevara-Valencia M., González Arno M. T. 2009. Estado nutrimental y crecimiento de vitroplantas de caña de azúcar en respuesta a reguladores de crecimiento. *Terra Latinoamericana* 27 (3): 177-185.

### **Congresos**

Efecto del polietilenglicol en el abatimiento nutrimental del medio de cultivo de vitroplantas de caña de azúcar. Genobiotec 2013 VI Congreso Internacional de Biotecnología y Genómica. Monterrey, México.

Concentraciones nutrimentales en caña de azúcar *in vitro* sometida a estrés hídrico, XXVI Reunión Científica, Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Veracruz 2013 y V Reunión de Investigación Agrícola, Pecuaria, Forestal y Acuícola en el Trópico Mexicano. Veracruz, México.

Respuestas adaptativas de cuatro variedades de caña de azúcar crecidas e medio líquido conteniendo polietilen-glicol, 2010. VII Encuentro Latinoamericano y del Caribe sobre Biotecnología Agropecuaria REDBIO. Guadalajara, México.

Aplicación de extracto de *Chrysanthemum morifolium* al cultivo *in vitro* de *Anthurium andreaeanum* L. Var. *anthapck*. 2010. Congreso Internacional de QFB 2010. No. 10.

Germinación *in vitro* del Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) y regeneración de múltiples brotes. 2008. XXI Reunión Científica, Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Veracruz y I del Trópico Mexicano 2008.

Concentraciones nutrimentales en caña de azúcar en respuesta a diferentes niveles de auxinas y citocininas. 2007. IX Simposio Internacional y IV Congreso Nacional de Agricultura Sostenible. XX Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Veracruz. ISBN 978-970-43-0287.

Micropropagación de Ginger (*Alpinia purpurata* Pink). 2004. V Congreso Nacional de Biotecnología Agropecuaria y Forestal. Universidad Autónoma de Chapingo. *Ponente.*

Germinación *in vitro* de *Heliconia collinsiana* Griggs var *collinsiana*. 2001. Reunión Científica Tecnológica y Agropecuaria, Veracruz. 2001.

### **Capítulos de libro**

Micropropagación de Ginger (*Alpinia purpurata* Pink). 2006. Avances de la Biotecnología Agropecuaria y Forestal en México. Capítulo de libro. ISBN: 968-02-0202-X Editorial. Asociación Nacional de Biotecnología Agropecuaria y Forestal, A.C. México.

### **Experiencia profesional**

Desde septiembre 2007 a la fecha: Técnico Académico de Tiempo Completo. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas.

02/2004- 09/2007: Investigador Auxiliar Adjunto. Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales. Colegio de Postgraduados. Campus Córdoba.

2003. Supervisor. FERMEX. Orizaba, Ver.

## **Formación de Recursos Humanos**

Análisis nutrimental en caña de azúcar (Var. Mex 69-290, CP 72-2086, ITV 92-1424 y CAZEMex 93-43) sometidas a estrés salino. Director de tesis, Licenciatura, 2013.

Análisis fisiológicos en caña de azúcar (*Saccharum* spp.) sometidas a estrés salino. Director de tesis, Licenciatura, 2012.

Relación de las unidades SPAD con el estado nutrimental en cuatro variedades de caña de azúcar. Director de tesis, Licenciatura, 2012.

Recopilación bibliográfica para la nutrición de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Director de tesis, Licenciatura, 2011.

Efecto de un biofertilizante en el análisis nutrimental y desarrollo de pino pátula (*Pinus patula*). Director de tesis, Licenciatura, 2011.

Compilación bibliográfica del limón persa (*Citrus latifolia*). Director de tesis, Licenciatura, 2011.

Regulación de *Trichoderma* sp. con *Paenibacullium polymyxa* en el desarrollo micelial de *Pleurotus ostreatus* en interacción con *Trichoderma* sp. en agar-agar. Director de tesis, Licenciatura, 2010.

Regulación de *Trichoderma* sp. con *Paenibacullium polymyxa* en el desarrollo micelial de *Pleurotus ostreatus* en agar papa dextrosa. Director de tesis, Licenciatura, 2010.

Compilación bibliográfica para la obtención y usos de los biocombustibles. Director de tesis, Licenciatura, 2010.

Abatimiento nutrimental en el cultivo *in vitro* de la caña de azúcar (Var. Mex 69-290 y CP 72-2086). Director de tesis, Licenciatura, 2010.

Desarrollo morfológico y unidades SPAD en vitroplantas de caña de azúcar sometidas a estrés hídrico con PEG 6000. Director de tesis, Licenciatura, 2010.

Efecto de las fitohormonas en el contenido nutrimental y lecturas SPAD en vitroplantas de caña de azúcar (Var. Mex 69-290 y CP 72-2086). Director de tesis, Licenciatura, 2010.

Desarrollo por la aplicación de biofertilizantes en caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en el Ingenio Central Progreso, Paso del Macho. Ver. Director de tesis, Licenciatura, 2009.

Composición química de cinco gramíneas forrajeras en el campo experimental La Posta. Paso del Toro. Ver. Director de tesis, Licenciatura, 2009.