



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA**

**ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS Y
TOLERANCIA A CADMIO EN CAÑA DE AZÚCAR**

LAURA YOLANDA RIVERA OLIVARES

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2011

La presente tesis, titulada: **Aclimatación de vitroplantas y tolerancia a cadmio en caña de azúcar**, realizada por la alumna: **Laura Yolanda Rivera Olivares**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

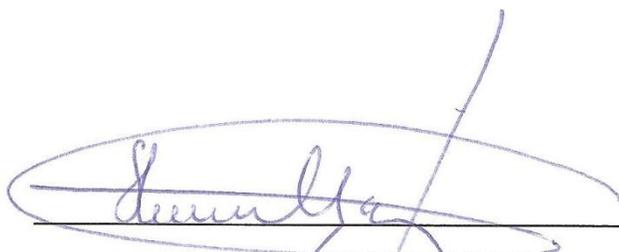
**MAESTRA EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA
CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERA:



DRA. LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ

ASESOR:



DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO

ASESORA:



DRA. OLGA TEJEDA SARTORIUS

ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS Y TOLERANCIA A CADMIO EN CAÑA DE AZÚCAR

Laura Yolanda Rivera Olivares, MC

Colegio de Postgraduados, 2011

RESUMEN

En un primer experimento se evaluó la aclimatación de vitroplantas de caña de azúcar de las variedades MEX69290 y CP722086 en tres sustratos; 1) TBZ: tezontle + bagazo de caña, 2) TCA: Tezontle + cascarilla de arroz y 3) TCZ: tezontle + cachaza; las mezclas en éstos en una proporción 40/60 (v/v). Las variables evaluadas fueron porcentaje de sobrevivencia, altura de plántula, diámetro de tallo, biomasa seca, azúcares solubles totales y concentración nutrimental. Las últimas tres variables fueron evaluadas en los vástagos y raíces. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cincuenta repeticiones por tratamiento. A los 30 d, la menor sobrevivencia de la variedad MEX69290 fue de 84%;, mientras que la de CP722086 de 64%; en ambos casos en el sustrato TCZ. La mayor sobrevivencia (98%) se presentó en el sustrato TCA para ambas variedades, así como en TBZ para MEX69290. El sustrato conteniendo cascarilla de arroz en combinación con la variedad CP722086 tuvieron los valores más altos en las variables de crecimiento. Por el contrario, la mayor concentración de nutrimentos de manera general fue observada en la variedad MEX69290, siendo evidente el efecto de dilución. La concentración de carbohidratos tanto en raíces como en vástago no presentó diferencias estadísticas por factores de estudio, ni por la interacción de éstos. Los resultados permiten concluir que la cascarilla de arroz en combinación con tezontle es una alternativa viable y de bajo costo, para la aclimatación de plántulas de caña de azúcar.

En un segundo experimento se evaluó el efecto de la adición de 0 y 1 mM de Cd en la solución nutritiva (Steiner al 10%) sobre la concentración nutrimental final de los vástagos en plantas de caña de azúcar. En este ensaño se evaluaron las mezclas de sustratos antes descritas y un cuarto sustrato consistente sólo en tezontle. Se utilizaron plantas de la variedad CP722086 en un factorial (factores: Cd y sustrato), completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Las concentraciones de N, P, Fe, Zn, Mn, B y Na no fueron afectadas por la adición de Cd a la solución nutritiva, mientras que la adición de 1 mM afectó positivamente las concentraciones de Ca y Mg; por el contrario, el Cd redujo las concentraciones de K. El factor sustrato, sólo no afectó en forma significativa las concentraciones de Ca, Zn, B y Na en vástago. Con excepción de Na, la interacción de los factores de estudio tuvo efectos significativos sobre la concentración de los elementos en el vástago. Los resultados permiten concluir que la caña de azúcar es una especie que tolera una concentración de Cd de 1 mM, en particular cuando es establecida en sustratos conteniendo cachaza

Palabras clave: aclimatación, cadmio, *Saccharum officinarum*, vitroplantas

ACCLIMATIZATION OF PLANTLETS AND CADMIUM TOLERANCE IN SUGAR CANE

Laura Yolanda Rivera Olivares, MC.

Colegio de Postgraduados, 2011

ABSTRACT

In a first experiment, the acclimatization of sugarcane plantlets of the varieties CP722086 and MEX69290 in three substrates mixtures (in a 40/60 ratio v/v): 1) TBZ: tezontle + bagasse, 2) TCA: tezontle + rice husk and 3) TCZ: tezontle + mill mud (filter cake, cachaza), were evaluated. The variables studied were: percentage of survival, seedling height, stem diameter, dry biomass, total soluble sugars and nutrient concentration. Last three variables were evaluated in stems and roots. A completely randomized design with 50 replicates per treatment was used. At day 30 after treatment (dat), the lowest survival in the variety MEX69290 was 84%, while that for CP722086 was at least 64%, in both cases in the substrate TCZ. The survival (98%) occurred in the TCA substrate for both varieties, as well as in TBZ for MEX69290. The substrate containing rice husk in combination with the variety CP722086 had the highest values in the variables of growth. By contrast, the highest concentration of nutrients was observed generally in the variety MEX69290, evidencing the effect of dilution. The carbohydrate concentration in roots and stem did not present statistical differences by any factor of study or by the interaction of them. The results suggest that rice husk in combination with tezontle is a viable, low cost substrate for the acclimatization of sugarcane plantlets. In a second experiment the effect of the addition of 0 and 1 mM Cd in the nutrient solution (Steiner 10%) on the final nutrient concentration in stems of sugarcane plants was evaluated. Besides the three substrates before indicated, a fourth substrate consisting only of tezontle was tested too. Plants of the variety CP722086 in a factorial experiment (factors: Cd and substrate) in a completely randomized design with four replicates per treatment were tested. The concentrations of N, P, Fe, Zn, Mn, B and Na were not affected by the addition of Cd to the nutrient solution, while the addition of 1 mM Cd positively affected Ca and Mg concentrations. On the contrary, Cd reduced K concentration. The factor substrate, just did not significantly affect the stem concentrations of Ca, Zn, B and Na in stem. With the exception of Na, the interaction between had significant effects on the concentration of elements in the stem. The results suggest that sugar cane is a species that tolerates a concentration of 1 mM Cd, particularly when it is established on substrates containing mill mud.

Key word: acclimation, cadmium, *Saccharum officinarum*, plantlets

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis hijos **DIANA SOFIA y MANUEL** ustedes forman una parte muy importante en mi vida y son la principal razón de la realización de este trabajo que también es de ustedes los amo y espero que esto algún día sea una inspiración más para que realicen todas sus metas.

A una persona muy especial a quien admiro mucho como profesionista y como ser humano mi esposo **EMANUEL** quien me ha brindado un gran apoyo y su amor incondicional.

A mis padres **YOLANDA y HERIBERTO** y hermanos **ANTONIA, URIEL, ALFREDO, SARAI y JOSUE** por su apoyo y su amor que me dan siempre.

A mis sobrinos **XEL-HA, ARACELY, MADIAN, SAMUEL, CARLOS Y EMILY** quienes brindan alegría a mi vida, los quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS

Al **CONACyT** por la beca otorgada para la realización de mi maestría.

Al **FIDEICOMISO REVOCABLE DE ADMINISTRACIÓN E INVERSIÓN No. 167304** del Colegio de Postgraduados por el apoyo financiero en su convocatoria 2010, para la realización de esta investigación.

A la **LPI 5 Biotecnología Microbiana, Vegetal y Animal** por las facilidades de equipos e infraestructura durante el desarrollo de la investigación.

A mi consejera **Dra. Libia Iris Trejo-Téllez** por su apoyo y comprensión durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados y todo mi reconocimiento a su labor hacia la investigación.

Al **Dr. Fernando Carlos Gómez Merino y a la Dra. Olga Tejada Sartorius** por sus valiosas aportaciones y sugerencias realizadas durante este trabajo de investigación.

A todos mis compañeros de generación por los consejos y los buenos momentos que vivimos durante nuestra estancia en el Colegio de Postgraduados y sobre todo a aquellos que estuvieron presentes en los momentos de arduo trabajo en especial a Cesar Tucuch, Ramiro Maldonado y Xóchitl Trujillo.

Y a todas aquellas personas que de algún modo estuvieron involucradas en mi desarrollo personal y profesional durante estos dos años.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA CAÑA DE AZÚCAR	1
1.1. Importancia económica de la caña de azúcar	1
1.2. Origen y clasificación botánica de la caña de azúcar	3
1.3. Literatura citada.....	5
CAPÍTULO II. ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum spp.</i>) EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS	6
I. INTRODUCCIÓN.....	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1. Aclimatación de vitroplantas	7
2.2.1. Concepto de aclimatación.....	7
2.2.2. Factores que afectan el proceso de aclimatación	7
2.3. Sustratos	10
2.3.1. Definición.....	10
2.3.2. Clasificación de sustratos	11
2.3.2.1. Propiedades físicas.....	11
2.3.2.2. Propiedades químicas	12
2.3.2.3. Características biológicas	14
2.3.2.4. Sustratos orgánicos	15
2.3.2.5. Sustratos inorgánicos	16
2.3.3. Caracterización de sustratos.....	16
2.3.3.1. Uso de sustratos en caña de azúcar	17
III. OBJETIVOS	19

	Página
3.1. Objetivo general.....	19
3.2. Objetivos particulares	19
IV. HIPÓTESIS.....	20
4.1. Hipótesis general.....	20
4.2. Hipótesis particulares.....	20
V. MATERIALES Y MÉTODOS	21
5.1. Material vegetal	21
5.2. Tratamientos.....	21
5.3. Ubicación del experimento y condiciones experimentales	22
5.4. Diseño experimental y de tratamientos	23
5.5. Análisis de las mezclas de sustratos.....	23
5.5.1. Análisis químico.....	23
5.5.2. Caracterización física de los sustratos.....	23
5.5.2.1. Curvas de retención de humedad	23
5.5.2.2. Relaciones masa volumen	25
5.6. Instalación del experimento	27
5.7. Variables respuesta	27
5.7.1. Supervivencia de vitroplantas	27
5.7.2. Altura de vitroplantas	28
5.7.3. Diámetro de tallo de vitroplantas.....	28
5.7.4. Biomasa seca.....	28
5.7.5. Azúcares solubles totales	28
5.7.6. Concentración nutrimental.....	28
5.8. Análisis estadísticos	28
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
6.1. Análisis químico de los sustratos	29
6.1.1. pH y conductividad eléctrica	29
6.1.2. Contenido nutrimental.....	30
6.2. Caracterización física de los sustratos.....	31
6.3. Variables de aclimatación	34
6.3.1. Supervivencia	34
6.3.2. Altura de plántula y diámetro de tallo	35

	Página
6.5.3. Biomasa a los 30 días.....	39
6.5.3.1. Biomasa de vástago	39
6.5.3.2. Biomasa de raíz.....	42
6.5.4. Biomasa a los 60 días.....	44
6.5.4.1. Biomasa de vástago	44
6.5.4.1. Biomasa de raíz.....	46
6.5.5. Azúcares solubles totales	49
6.5.6. Concentración nutrimental	51
6.5.6.1. Concentraciones nutrimentales a los 30 días.....	51
6.5.6.1. Nitrógeno.....	51
6.5.6.1.2. Fósforo, potasio, calcio y magnesio	52
6.5.6.1.3. Micronutrientos	56
6.5.6.2. Concentración nutrimental a los 60 días	58
6.5.6.2.1. Nitrógeno	58
6.5.6.2.2. Fósforo, potasio, calcio y magnesio	58
6.5.6.2.3. Micronutrientos	62
VII. CONCLUSIONES.....	64
VIII. LITERATURA CITADA	65
CAPÍTULO III. CADMIO EN LA CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum spp.</i>) VARIEDAD CP722086 ESTABLECIDA EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS.....	68
I. INTRODUCCIÓN.....	68
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	69
2.1. El cadmio en la naturaleza.....	69
2.2. El cadmio en las plantas.....	69
III. OBJETIVO GENERAL	73
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	73
IV. HIPÓTESIS.....	74
4.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	74
V. MATERIALES Y MÉTODOS	75
5.1. Ubicación del experimento y condiciones experimentales	75
5.2. Material vegetal	75
5.3. Tratamientos.....	75

	Página
5.4. Diseño experimental	77
5.5. Instalación del experimento	77
5.6. Variables respuesta	77
5.7. Análisis estadísticos	77
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
6.1. Concentración nutrimental	78
6.1.1 Nitrógeno	78
6.1.2. Fósforo	80
6.1.3. Potasio.....	83
6.1.4. Calcio	86
6.1.5. Magnesio	88
6.1.6. Hierro.....	91
6.1.7. Zinc.....	94
6.1.8. Manganeso.....	96
6.1.9. Boro.....	98
6.1.10. Sodio	100
6.1.11. Cadmio	102
VII. CONCLUSIONES.....	104
VIII. LITERATURA CITADA	106

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA CAÑA DE AZÚCAR	
Cuadro 1. Superficie sembrada y cosechada, producción y rendimiento de los principales estados productores de caña de azúcar en México.	2
Cuadro 2. Rendimientos promedio en algunos países productores de caña de azúcar.	3
CAPÍTULO II. ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum spp.</i>) EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS	
Cuadro 1. Valor de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en algunos sustratos.....	14
Cuadro 2. Tratamientos evaluados.....	21
Cuadro 3. Valores de pH y CE en los sustratos utilizados en la aclimatación de vitroplantas de caña de azúcar. TBZ: Tezontle + bagazo de caña; TCA: Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ: Tezontle + cachaza.	29
Cuadro 4. Niveles óptimos de contenido nutrimental para los sustratos de cultivo (Abad <i>et al.</i> 1992 citado por Ansorena, 1994)..	30
Cuadro 5. Concentraciones nutrimentales en los extractos de saturación de los sustratosconteniendo residuos agrícolas. TBZ: Tezontle + bagazo de caña; TCA: Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ: Tezontle + cachaza.	30
Cuadro 6. Niveles óptimos para las propiedades físicas de los sustratos de cultivo.	31
Cuadro 7. Parámetros de la curva de retención de humedad determinados en tres sustratos TBZ: tezontle + bagazo de caña; TCA: tezontle + cascarilla de arroz y TCZ: tezontle + cachaza.....	33
Cuadro 8. Caracterización física de los tres sustratos conteniendo residuos agrícolas.....	34
Cuadro 9. Porcentaje de sobrevivencia de plántulas en los días 15, 30 y al finalizar el experimento (60 días).	35
Cuadro 10. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de micronutrientes en raíz y vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.....	56
Cuadro 11. Efecto del factor de estudio variedad sobre la concentración de micronutrientes en vástago y raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.....	56
Cuadro 12. Efecto de la interacción de factores de estudio sustrato y variedad de caña de azúcar sobre la concentración de micronutrientes en raíz y vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.	57

Cuadro 13. Concentración de micronutrientos en vástago y en raíz por efecto del sustrato después de 60 días de aplicados los tratamientos.	63
Cuadro 14. Concentración de micronutrientos en vástago y raíz por efecto de la variedad de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos.	63
Cuadro 15. Concentración de micronutrientos en vástago y raíz por efecto de la interacción sustrato/variedad después de 60 días de aplicados los tratamientos.....	64
CAPÍTULO III. CADMIO EN LA CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum spp.</i>) VARIEDAD CP722086 ESTABLECIDA EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS	
Cuadro 1. Principales efectos del Cd en las funciones fisiológicas de las plantas descritos por diversos autores (Pernia <i>et al.</i> , 2008).	71
Cuadro 2. Tratamientos evaluados	75
Cuadro 3. Concentración de la solución nutritiva de Steiner al 10% (Steiner, 1984).....	76
Cuadro 4. Composición de la mezcla de micronutrientos empleada para complementar la solución nutritiva.	76
Cuadro 5. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de N en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	78
Cuadro 6. Efecto simple del factor Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de N en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	78
Cuadro 7 Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	80
Cuadro 8. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	81
Cuadro 9. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	83
Cuadro 10. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	86
Cuadro 11. Efecto del sustrato utilizado sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	87
Cuadro 12. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	89

	Página
Cuadro 13. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Fe en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	92
Cuadro 14. Efecto del sustrato utilizado sobre la concentración de Fe en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	92
Cuadro 15. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Zn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	94
Cuadro 16. Efecto simple de los factores de estudio sobre la concentración de Zn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	95
Cuadro 17. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Mn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	96
Cuadro 18. Efecto simple de los factores de estudio sobre la concentración de Mn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	96
Cuadro 19. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de B en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	98
Cuadro 20. Efecto simple de los factores de estudio sobre la concentración de B en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	99
Cuadro 21. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Na en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	100
Cuadro 22. Efecto simple de los factores de estudio y su interacción sobre la concentración de Na en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	101
Cuadro 23. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	102
Cuadro 24. Efecto simple del factor sustrato sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO II. ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS	
Figura 1. Curva característica de humedad de los sustratos.....	32
Figura 2. Efecto del factor de estudio “sustrato” sobre la altura de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento..	36
Figura 3. Efecto del factor de estudio “variedad” de caña de azúcar sobre la altura de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento.....	36
Figura 4. Efecto de la interacción de los factores de estudio “sustrato/variedad” de caña de azúcar sobre la altura de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento..	37
Figura 5. Efecto del factor de estudio sustrato sobre el diámetro de tallo de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento.....	38
Figura 6. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre el diámetro de tallo de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento.....	38
Figura 7. Efecto de los factores de los estudio sustrato/variedad de caña de azúcar sobre el diámetro de tallo de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento.....	39
Figura 8. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa en fresco y seca del vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos	40
Figura 9. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la biomasa en fresco y seca del vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.....	41
Figura 10. Efecto de los factores de estudio sustrato/variedad de caña de azúcar sobre la biomasa en fresco y seca del vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.....	41
Figura 11. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa de raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.....	42
Figura 12. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la biomasa de raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos..	43
Figura 13. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad de caña de azúcar sobre la biomasa de raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos	44
Figura 14. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa en vástago de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos.....	45

Figura 15. Efecto del factor de estudio variedad sobre la biomasa de vástago de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 46

Figura 16. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la biomasa en vástago de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 46

Figura 17. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 47

Figura 18. Efecto del factor de estudio variedad sobre la biomasa en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 48

Figura 19. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la biomasa en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 48

Figura 20. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de azúcares en vástago y raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 49

Figura 21. Efecto del factor de estudio variedad sobre la concentración de azúcares en vástago y raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 50

Figura 22. Concentración de azúcares por efecto de los factores de estudio sustrato/variedad de caña de azúcar en vástago y raíz después de 60 días de aplicados los tratamientos..... 50

Figura 23. Porcentaje de N a los 30 días después de la aplicación de los tratamientos en raíz y vástago. 52

Figura 24. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de P, K, Ca y Mg en vástagos de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos..... 52

Figura 25. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de P, K, Ca y Mg en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos 53

Figura 26. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la concentración nutrimental de P, K, Ca y Mg en vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos..... 53

Figura 27. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la concentración de P, K, Ca y Mg en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos 54

Figura 28. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la concentración nutrimental de P, K, Ca y Mg en vástagos de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos..... 55

Figura 29. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la concentración nutrimental de P, K, Ca y Mg en raíces de vitroplantas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.....	55
Figura 30. Concentración de N en raíz y vástago a los 60 días después de la aplicación de los tratamientos.	58
Figura 31. Concentración de P, K, Ca y Mg en vástago por efecto del sustrato después de 60 días de aplicados los tratamientos	59
Figura 32. Concentración de P, K, Ca y Mg en raíz por efecto del sustrato después de 60 días de aplicados los tratamientos.....	59
Figura 33. Concentración de P, K, Ca y Mg en vástago por efecto de la variedad de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..	60
Figura 34. Concentración de P, K, Ca y Mg en raíz por efecto de la variedad de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos..	61
Figura 35. Concentración de P, K, Ca y Mg en vástago por efecto de la interacción sustrato/variedad después de 60 días de aplicados los tratamientos.....	61
Figura 36. Concentración de P, K, Ca y Mg en vástago por efecto de la interacción sustrato/variedad después de 60 días de aplicados los tratamientos.....	62
CAPÍTULO III. CADMIO EN LA CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum spp.</i>) VARIEDAD CP722086 ESTABLECIDA EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS	
Figura 1. Efecto del sustrato en la concentración de N en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.	79
Figura 2. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd en la concentración de N en vástago de caña de azúcar variedad CP722086	80
Figura 3. Efecto del sustrato utilizado sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	82
Figura 4. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	83
Figura 5. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	84
Figura 6. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	85
Figura 7. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	86
Figura 8. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....	87

Figura 9. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086..... 88

Figura 10. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. 89

Figura 11. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. 90

Figura 12. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086 91

Figura 13. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de Fe en vástago de caña de azúcar variedad CP722086..... 93

Figura 14. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Fe en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086 93

Figura 15. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Zn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. 95

Figura 16. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de Mn en vástago de caña de azúcar variedad CP722086. 97

Figura 17. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Mn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. 98

Figura 18. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de B en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. 99

Figura 19. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.....103

Figura 20. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086..... 104

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA CAÑA DE AZÚCAR

1.1. Importancia económica de la caña de azúcar

La caña de azúcar es un importante cultivo de las zonas tropicales y subtropicales, cultivado en cerca de 74 países localizados entre los 40° LN y 32° LS, superficie que comprende la mitad del globo terrestre (FAO, 1998). Brasil e India contribuyen con el 50% de la producción mundial (el primero aporta el 28% y el segundo 22% del total, respectivamente), seguidos por China, Tailandia, Pakistán y México (USDA, 2008).

En México, la caña de azúcar es cultivada principalmente en 15 estados de la República Mexicana: Veracruz, Tamaulipas, Tabasco, Sinaloa, San Luis Potosí, Quintana Roo, Puebla, Oaxaca, Nayarit, Morelos, Michoacán, Jalisco, Colima, Chiapas y Campeche (Toledo *et al.*, 2005), como se muestra en el Cuadro 1. En estos estados se comprenden 227 municipios en los que se concentra el 13% de la población nacional (Sosa, 2006). El rendimiento promedio en nuestro país es de 73.15 Mg ha⁻¹; lo que se traduce en una producción aproximada de 4.9 millones de Mg de azúcar anualmente (Toledo *et al.*, 2005) en los 57 ingenios azucareros. Así, la producción de caña de azúcar y azúcar representa la principal agroindustria de nuestro país y también es una de las que ofrece un mayor número de empleos (Aguilar, 2007). El cultivo de la caña de azúcar en México produce el 0.5% del producto interno bruto (PIB) nacional y 8.9% del PIB del sector agropecuario y el 2.4% de la industria manufacturera (CNIAA, 2007).

Cuadro 1. Superficie sembrada y cosechada, producción y rendimiento de los principales estados productores de caña de azúcar en México (SIAP, 2011).

Estado	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (ton ha ⁻¹)
	sembrada	cosechada	obtenida	obtenido
MORELOS	17,818	16,726	1,958,966	117.121
PUEBLA	16,174	16,174	1,809,721	111.891
COLIMA	13,619	13,519	1,272,084	94.097
CHIAPAS	30,688	30,688	2,722,824	88.785
JALISCO	71,703	67,177	5,556,227	82.71
NAYARIT	33,762	33,162	2,691,262	81.155
MICHOACAN	15,034	14,395	1,154,867	80.227
SINALOA	21,748	16,314	1,252,961	76.803
VERACRUZ	273,92	268,908	17,400,131	64.707
TAMAULIPAS	59,073	51,568	3,322,548	64.43
QUINTANARRO	27,384	25,654	1,565,718	61.031
SAN LUIS POTOSI	68,787	60,323	3,675,162	60.925
OAXACA	66,869	60,418	3,576,314	59.193
TABASCO	32,179	28,068	1,411,288	50.282
CAMPECHE	10,415	8,624	405,345	47
TOTAL	759,172	711,698	49,775,419	69.939

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA. Avance de siembras y cosecha. Resumen Nacional Por estado. Preliminares Septiembre 2011. Riego +Temporal

Es importante destacar que el rendimiento promedio de caña de azúcar a nivel mundial es de 65 Mg ha⁻¹ (Alam, 2007) y que existe un amplia variación en los rendimientos promedio entre países (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Rendimientos promedio en algunos países productores de caña de azúcar (Alam, 2007).

País	Rendimiento promedio, Mg ha⁻¹
Egipto	105.0
Filipinas	92.6
Tailandia	92.6
Brasil	85.0
China	77.1
Australia	75.5
México	73.1
India	70.6
Pakistán	46.0

Además de azúcar, la caña de azúcar produce numerosos y valiosos subproductos como el alcohol, utilizado por la industria farmacéutica; el etanol utilizado como combustible; bagazo de caña utilizado para la fabricación de papel y conglomerados; así como la cachaza utilizada como una rica fuente de materia orgánica y nutrimentos para la producción de cultivos (Khasif y Khan, 2007).

1.2. Origen y clasificación botánica de la caña de azúcar

El origen de la caña de azúcar cultivada no es claro, a pesar de estudios basados en la genética molecular. Algunos autores apoyan la teoría de la domesticación de *Sacharum robustam* Brandes & Jes ex Grassl en Papúa, Nueva Guinea. No obstante, otros autores han respaldado la idea de que la domesticación ocurrió en la India o en el sur de China (Sillset *al.*, 1995).

Esta especie es una de las más complejas desde el punto de vista genético, dado que presenta características citogenéticas excepcionales en comparación con la mayoría de las plantas (Grivet *et al.*, 1994), muestra aneuploidía, mosaicismo cromosómico e irregularidades meióticas entre otros fenómenos (Moore e Irvine, 1991; Nair *et al.*, 1999).

La caña de azúcar pertenece al género *Saccharum*, miembro de la tribu Andropogonae de la familia Gramineae (Poaceae), en las que también se encuentran el sorgo y el maíz. Como ya se mencionó anteriormente, todos los miembros del género *Saccharum* son altamente diploides y genéticamente complejos (Portieles *et al.*, 2002). Dentro de este género y con base en las características morfológicas de la hoja, tallo e inflorescencia, se han clasificado seis especies: *S. officinarum*, *S. edule*, *S. barberi*, *S. sinense* (especies domesticadas); *S. spontaneum* y *S. robustum* (especies silvestres) (Guimaraes y Sobral, 1998).

La caña de azúcar que es cultivada en la actualidad (*Saccharum* spp.) es un complejo de híbridos procedentes de cruces de *S. officinarum* L. y *S. spontaneum* L., y en algunos linajes *S. sinense* Roxb. o *S. Barberi* Jesw (Edme *et al.*, 2005). Los programas de cultivo inicialmente se centraron en la hibridación de clones de *S. officinarum*; no obstante, pronto progresó la incorporación de cruzamientos inter-específicos con *S. spontaneum*. Esto resultó en una mejora de las características agronómicas, como por ejemplo la resistencia a enfermedad, pero requirió de un programa de retrocruzamiento con *S. officinarum*, denominado "nobilización", para elevar el contenido de sacarosa (Roach, 1989; Edme *et al.*, 2005). Por lo anterior, la especie *S. officinarum* es conocida como caña noble, por su alto contenido de sacarosa y bajo contenido de fibra. Actualmente la propagación *in vitro* es una técnica usada para reproducir de manera masiva todos estos híbridos; sin embargo, dentro de este proceso la aclimatación de las vitroplantas es vital para que el potencial de estas sea expresado al máximo en condiciones de campo y obtener las producciones y rendimientos esperados.

1.3. Literatura citada

- Aguilar, R. N. 2007. Bioetanol de la caña de azúcar. Avances en Investigación Agropecuaria 11(3):25-39.
- Alam, S. M. 2007. Sugarcane production and sugar crisis. Economic Review. Noviembre.
- CNIAA. 2007. Manual Azucarero Mexicano. Edit. CIA Editora del Manual Azucarero 487 p.
- Edme, S. J.; Miller, J. D.; Glaz, B.; Tai P., Y.-P. and Comstock, J. C. 2005. Genetic contribution to yield in the Florida sugarcane industry accross 33 years. Crop Science 45: 92–97.
- FAO. 1998. Sugar and Sweetener. FAO Production Year Book.
- Grivet, L.; D’hont, A.; Dufour, P.; Hamon, P. and Roques, D. 1994. Comparative genome mapping of sugarcane with others species within the Andropogoneae tribe. Heredity 73: 500-508.
- Guimaraes, C. T and Sobral, B. W. S. 1998. The *Saccharum* complex: relation to other Andropogoneae. Plant Breed Rev. 16: 269 –288.
- Kashif, M. and Khan, F. A. 2007. Divergence in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) based on yield and quality traits. Pak. J. Bot. 39(5): 1559-1563.
- Moore, P.; and Irvine, J. 1991. Genomic mapping of sugarcane and its potential contribution to improvement and to selection of new varieties. Proc. South African Sugar Technol. Assoc. 65: 96-102.
- Nair, V.; Nair, S.; Sreenivasan, T. and Mohan, M. 1999. Analysis of genetic diversity and phylogeny in *Saccharum* and related genera using RAPD markers. Genetic Resources and Crop Evolution 46: 73-79.
- Portieles, R.; Rodríguez, R.; Hernández, I.; Canales, E. y Cornide, M. T. 2002. Determinación de un número cromosómico de un grupo de clones silvestres de origen desconocido y clones de fundación del complejo *Saccharum*. Cultivos Tropicales 23(2):69-72.
- Roach, B T. 1989. Origin and improvement of the genetic base of sugarcane. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology 11: 34–47.
- Sills, G. R.; Bridges, W.; Al-Janabi, S. M. and Sobral B. W. S. 1995. Genetical analysis of agronomic traits in a cross between sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) and its presumed progenitor (*S. robustum* Brandes & Jesw. ex Grassl). Molecular Breeding 1: 355-363.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2011. http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=208 Consultado el: 20 de Noviembre de 2011.
- Sosa, D. A. 2006. Introducción, expansión y consolidación de la agroindustria azucarera en México. Tesis de Grado en Manejo y Explotación de los Agroecosistemas de la Caña de Azúcar. Universidad Veracruzana. México. 124 p.
- Toledo, T. E., Pohlan, J.; Gehrke-Vélez, M. and Leyva-Galan, A. 2005. Green Sugarcane versus Burned Sugarcane – results of six years in the Soconusco region of Chiapas, Mexico. Sugar Cane International 23(1): 20-27.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2008. http://www.usda.gov/wps/portal/!ut/p/_s.7_0_A/7_0_1OB?navtype=SU&navid=AGRICULTUR Consultado el: 24 de enero de 2010.

CAPÍTULO II.

ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*) EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS

I. INTRODUCCIÓN

La producción de caña de azúcar en México es de gran importancia en el sector agrícola, cuenta con una superficie de 812 mil ha a nivel nacional y su producción genera 440 mil empleos directos y 2.5 millones de empleos indirectos. Debido a su importancia tanto económica como social, son diversas las investigaciones que se hacen para resolver los problemas que en la actualidad aquejan al sector cañero de nuestro país. La producción de caña de azúcar en México no es suficiente para cubrir las demandas de la agroindustria azucarera, estimándose que en 2012, el consumo llegará a 6.4 millones de Mg. Por lo anterior, el desarrollo del área biotecnológica dentro del sector cañero ha representado un gran beneficio; en particular, la micropropagación vegetal de caña de azúcar representa una alternativa para el aumento de la productividad, posibilitando al productor, desde el inicio del ciclo productivo, a tener un mayor control sobre los aspectos fitosanitarios y genéticos de las plantas. La fase más crítica de la micropropagación es, sin duda, la aclimatación. Si bien existen diversas investigaciones acerca del efecto que tienen los sustratos sobre la aclimatación de las vitroplantas de caña de azúcar, ésta es escasa debido a la gran variabilidad de materiales que se pueden usar y es desconocido el efecto de la mayoría de ellos, lo cual sugiere que se encuentran muchas opciones disponibles para obtener las mejores respuestas en la adaptabilidad de las vitroplantas a condiciones *ex vitro* las cuales no impliquen un alto costo ecológico y económico dentro del proceso de producción, al emplear subproductos agrícolas como sustratos. En este contexto, esta investigación tiene como objetivo caracterizar y evaluar el efecto de mezclas de tezontle con subproductos agrícolas en la aclimatación de dos variedades de caña de azúcar.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Aclimatación de vitroplantas

2.2.1. Concepto de aclimatación

La aclimatación de vitroplantas (plantas cultivadas *in vitro*) consiste en el paso de condiciones *in vitro* a condiciones donde se desarrollarán para su cultivo, con el objetivo de que éstas superen las dificultades ocasionadas cuando son removidas del ambiente *in vitro*; de esta manera, se preparan para su trasplante definitivo (Vilchez *et al.*, 2007).

Durante la fase de aclimatación ocurren cambios morfológicos y fisiológicos en las plantas, que permiten superar la excesiva pérdida de agua por transpiración y la disminución de las tasas fotosintéticas. El grosor de las hojas generalmente incrementa, el mesófilo de éstas incrementa su diferenciación, la densidad de estomas disminuye y la forma de los estomas cambia de circular a elíptica. Los cambios más importantes incluyen el desarrollo de la cutícula, ceras epicuticulares y la regulación estomática efectiva de la transpiración que conduce a la estabilización del estatus de agua en las plantas (Pospíšilová *et al.*, 1999).

2.2.2. Factores que afectan el proceso de aclimatación

La calidad intrínseca de las vitroplantas es uno de los factores más importantes que influyen la transición a condiciones *ex vitro* (Domínguez y Donayre, 2006).

Los sustratos ejercen una influencia significativa en la arquitectura del sistema radical de las vitroplantas, influyen el estado nutricional y la traslocación de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera (De Rezende *et al.*, 2000). Por ello, la eficiencia del proceso de adaptación depende, entre otros factores, de la elección del sustrato y de la obtención de una relación adecuada entre los componentes de la mezcla, que asegure una buena supervivencia en el trasplante. Dicho sustrato deberá permitir la formación de un pan de tierra con una buena estructura. Se trata de materiales sólidos y porosos, de origen natural o sintético, que solos o en

mezclas, permiten un crecimiento adecuado de las plantas en condiciones controladas (Abad, 1989; Díaz *et al.*, 2004).

En esta fase de adaptación, las vitroplantas se deben volver autótrofas, tienen que desarrollar raíces, brotes funcionales y aumentar su resistencia a la desecación y al ataque de organismos patógenos (Galindo *et al.*, 2008). El uso de fertilizantes químicos en esta fase se ha llevado a cabo con buenos resultados, no obstante, se pueden obtener resultados similares a la fertilización mineral con el uso de biofertilizantes, los cuales producen efectos positivos sobre las plantas y disminuyen los posibles peligros de contaminación ambiental (Díaz *et al.*, 2004).

En la fase de aclimatación se pretende que las plantas que han crecido *in vitro* y por lo tanto sólo han estado expuestas a un microambiente seleccionado que ofrece unas condiciones mínimas de estrés y casi óptimas para la multiplicación de las plantas, se adapten a condiciones *ex vitro* donde las condiciones no son asépticas, ni la luz, temperatura y humedad están controladas, y donde el crecimiento ha de ser autótrofo y no heterótrofo como *in vitro*. En el momento en que se extraen los explantes o plantines enraizados de los frascos, están poco adaptados a crecer en un invernadero, ya que estos explantes han enraizado y crecido en ambientes con una humedad relativa muy elevada y generalmente tienen estomas (estructuras responsables de regular la transpiración y pérdida de agua en la planta) que no son completamente funcionales frente a descensos de la humedad relativa y, por lo tanto, demasiado lentos para evitar la desecación del explante. Por otra parte, crecer en ambientes tan húmedos también suele implicar la falta de una cutícula con cera bien desarrollada, que representa la barrera física para evitar la pérdida de agua a lo largo de toda la superficie de la planta (Castillo, 2004).

Son varios los factores a considerar en el momento de la aclimatación de las vitroplantas. Dentro de los más importantes se encuentran la luz, la temperatura y la humedad relativa. La manipulación de éstas es crítica para que la aclimatación sea exitosa, y varios autores mencionan que el manejo de estas variables debe incrementarse de forma gradual para obtener mejores resultados.

La luz ejerce un efecto importante en la supervivencia de las plántulas; este es uno de los factores que se deben manejar con cuidado en los primeros momentos de permanencia de las plántulas en las condiciones *ex vitro*. Cuando la luz no es correctamente manejada y las plántulas son sometidas a altas intensidades de iluminación, aparecen síntomas de foto-inhibición del aparato fotosintético y foto-degradación de las clorofilas (Rodríguez *et al.*, 2000).

De acuerdo a los resultados obtenidos por Rodríguez *et al.* (2000), la luz tiene sus principales efectos sobre la supervivencia de plántulas en las dos primeras semanas, y recomiendan trabajar con un valor de intensidad lumínica superior a $240 \mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ para alcanzar altos porcentajes de supervivencia; posterior a esta fecha el comportamiento es muy estable y con intensidades más bajas, la estabilidad se alcanza una semana después.

Los plantines enraizados, deben ser aclimatados a las condiciones de humedad del invernadero, disminuyendo progresivamente la humedad relativa e incrementando progresivamente la intensidad de luz. Estos plantines se plantarán en contenedores (almacigueras) cubiertos por un plástico, para mantener la humedad relativa elevada (Castillo, 2004).

Lee *et al.* (2003) proponen los siguientes pasos en el caso de anturio, para el manejo de la humedad relativa en la aclimatación. Los anturios se instalaron en invernadero con un sistema de nebulización donde se aplicó humedad relativa a casi 100% en las primeras seis semanas a razón de 8 s por 10 min durante seis horas diarias. En las dos semanas siguientes se ajustó la humedad al 75% con humedecimiento de 3 s por 4 min durante 4 h y en las dos siguientes semanas se aplicó el 65%, con los mismos tiempos que el periodo anterior por 2 h diarias. Al final de la sexta semana se suspende la humedad artificial y la planta queda expuesta a la humedad relativa ambiental.

En resumen, durante la fase de aclimatación de caña de azúcar se pueden establecer dos etapas: un periodo de lento crecimiento con baja formación de raíces y hojas, en el cual las plántulas realizan sus funciones a expensas de las reservas adquiridas en la fase *in vitro*; la otra etapa está caracterizada por un

crecimiento rápido, asociado a una nueva emisión del sistema radical y a la formación de hojas con características normales (Rodríguez *et al.*, 2000).

2.3. Sustratos

2.3.1. Definición

Un sustrato es definido como aquel material sólido diferente al suelo, que puede ser natural o sintético, mineral u orgánico, el cual, colocado en un contenedor, de forma pura o mezclado permite el anclaje de las plantas a través de su sistema radicular (Pastor, 1999).

Los sustratos están formados por tres fases y cada una de ellas cumple una importante función:

- Fase sólida, que es la responsable del anclaje de la raíz y por lo tanto, asegura la integridad de la planta.
- Fase líquida, que es muy importante en el suministro del agua y fertilizantes (nutrimentos) a la planta.
- Fase gaseosa, que es la responsable del transporte del dióxido de carbono y oxígeno entre la raíz y el medio externo (Castellanos y Vargas, 2003).

El mercado actual ofrece una diversidad de estos materiales, los cuales presentan propiedades químicas, físicas y biológicas propias para un buen desarrollo de las plantas. Sin embargo, aspectos como el precio, el manejo, la finalidad, la productividad y la disponibilidad de éstos, son factores decisivos en el éxito o fracaso de la utilización de los mismos (Pastor, 1999).

El propósito de un medio es propiciar un buen crecimiento, dentro del espacio limitado de un recipiente, y preparar las plantas para un trasplante exitoso (OIRSA, 2005). El desarrollo de los sustratos agrícolas tiene su origen en el cultivo de contenedores. Desde que se introdujo este sistema de producción se planteó la necesidad de un cambio conceptual con respecto al cultivo tradicional en el suelo (Valenzuela y Gallardo, 2003). De acuerdo con OIRSA (2005) a diferencia del

suelo que mantiene más o menos estables sus características en el tiempo, los sustratos no se comportan de igual forma. Varios materiales y sus mezclas no siempre son la suma de las características de sus partes, por lo que lo importante de un sustrato no son sus ingredientes y componentes si no sus propiedades y parámetros.

2.3.2. Clasificación de sustratos

En la caracterización de sustratos se suelen distinguir tres tipos de propiedades: físicas, químicas y biológicas. La importancia del conocimiento de estas propiedades radica en que de ellas dependerá el manejo adecuado de la fertilización y del riego y, por lo tanto, el éxito del cultivo (Burés, 1997).

2.3.2.1. Propiedades físicas

Pastor (1999) menciona que las propiedades físicas vienen determinadas por la estructura interna de las partículas, su granulometría y el tipo de empaquetamiento.

El conocimiento de los valores de densidad aparente y de densidad real son necesarios para establecer las cantidades de sustratos necesarias en peso y volumen para la muestra en marcha de una instalación. También la relación entre ambas variables nos va a dar datos de porosidad total y el volumen del líquido necesario para regar (Luque y Pérez, 1976).

El espacio poroso o porosidad total es la porción no sólida del volumen del sustrato. Representa el volumen de aire del material seco en estufa expresado como un porcentaje del volumen total (Pire y Pereira, 2003). Las partículas que componen los sustratos pueden tener tamaños muy diversos. La distribución de tamaños de partículas que componen un material se expresa mediante la granulometría, que puede caracterizarse fácilmente mediante el tamizado (Burés, 1997). Debido a que los sustratos están constituidos por una mezcla de partículas de diferentes tamaños, es de esperar que sus propiedades físicas se vean afectadas en función de la distribución del tamaño de estas, por lo que la

caracterización granulométrica de los materiales es una práctica de rutina (Castellanos y Vargas, 2003).

La capacidad de retención de agua por un medio se determina a partir del tamaño de sus retículas, de su forma y de su porosidad. El agua se retiene en la superficie de las partículas y también en el espacio formado por los poros; mientras más pequeñas sean las partículas, estarán más cerca situadas unas de otras y, por lo tanto, mayor será el espacio de poros y su superficie (Resh, 2001).

En cultivo en contenedor la máxima cantidad de agua retenida por un sustrato es la capacidad de contenedor. Se define capacidad de contenedor como el porcentaje total de agua en volumen retenido por un sustrato, con un potencial matricial igual a cero en la superficie del contenedor y en ausencia de evapotranspiración (Burés, 1997).

La capacidad de aireación es la proporción del volumen del sustrato cultivado ocupado por aire, o por el porcentaje de aire que queda en el sustrato cuando se aplica una tensión de 10 cm de carga de agua de tensión. El nivel óptimo oscila entre 20 y 30% en base volumen, mientras que para sustratos inorgánicos este intervalo oscila entre 25 y 35% (Castellanos y Vargas, 2003).

2.3.2.2. Propiedades químicas

Dentro de esta categoría existe una clasificación para los sustratos de acuerdo a sus propiedades. Pastor (1998) los caracteriza de la siguiente forma:

- Químicamente inertes que son aquellos que no se descomponen química o bioquímicamente, no liberan elementos solubles de forma notable ni tiene capacidad de absorber elementos añadidos a la solución del sustrato.
- Químicamente activos que liberan elementos debido a la degradación, disolución o reacción de los compuestos que forman el material sólido de los sustratos, o bien, adsorbiendo elementos en su superficie que pueden intercambiar con los elementos disueltos en la fase líquida.

De acuerdo a Burés (1997), las propiedades químicas del sustrato se refieren de un modo macroscópico a las reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales, intercambio de iones o descomposición de la materia orgánica, siendo las determinaciones químicas que se utilizan generalmente para la caracterización de sustratos las siguientes.

- pH: dentro de las reacciones ácido–base existe una reacción de especial importancia en los sustratos: la de auto-ionización del agua. Algunos materiales se hidrolizan reaccionando con el agua de modo que los iones no combinados contribuyen a acidificar o a alcalinizar la solución del sustrato. El valor del pH varía en función de la dilución, por lo que cuando se comparen distintos pH deben estar realizados con la misma proporción de sustrato: agua.
- Salinidad: Se define como la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato (Urrestarazu, 2000). Las causas que provocan un incremento en la salinidad del sustrato, cuando este se encuentra en el contenedor, son:
 - ✓ La presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, cuando se mineralizan para producir nitratos, o bien, cuando liberan sales mediante difusión, en una cantidad superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas.
 - ✓ Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego a la solución nutritiva, es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las pérdidas por lixiviación.
 - ✓ Cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes.
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC). Es la capacidad de un sustrato de absorber e intercambiar iones. La CIC es la suma de todos los cationes intercambiables o complejo de cambio. La capacidad de intercambio

catiónico depende del pH. Los materiales muy ácidos, o que tiene el complejo de cambio saturado de H^+ , liberan iones H^+ que se intercambian con los iones de la solución. La CIC de algunos sustratos puede observarse en el **Cuadro 1** (Pastor, 1998).

Cuadro 1. Valor de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en algunos sustratos (Pastor, 1998).

Sustrato	CIC ($cmol_c kg^{-1}$)
Turba clara	115
Turba negra	200-400
Corteza de Pino	95
Vermiculita gruesa	27
Perlita gruesa	6
Lana de roca	0

- Capacidad amortiguadora. Mide el poder amortiguador sobre cambios rápidos de pH provocados por la adición de fertilizantes de carácter ácido o básico al sustrato, se estima mediante curvas de valoración del sustrato frente a los ácidos o bases. La capacidad tampón de un sustrato aumenta con la capacidad de intercambio catiónico (Burés, 1997).

2.3.2.3. Características biológicas

Todos los sustratos orgánicos, incluso los relativamente estables, son susceptibles de degradación biológica (Urrestarazu, 2000), mediante reacciones químicas de hidrólisis, o bien, por la acción de microorganismos o descomposición biológica. A efectos prácticos, la degradación de la materia orgánica se manifiesta en el sustrato orgánico mediante la aparición de deficiencias de nitrógeno, liberación de

elementos y sustancias que pueden ser beneficiosas o fito-tóxicas, cambios en el balance de la relación O_2/CO_2 , reducciones del volumen sustrato, entre otros. (Pastor, 1998).

Los tejidos vegetales, que forman la mayor parte de los sustratos orgánicos, contienen un amplio número de compuestos orgánicos, como los carbohidratos aminoácidos y proteínas, lípidos, ácidos nucleídos o las ligninas (Burés, 1997). Suelen utilizarse algunos parámetros como indicadores del estado de la materia orgánica. Estos son los denominados parámetros de madurez de un compost, que pueden ser de carácter químico (relación carbono/nitrógeno o C/N o grado de descomposición) o de carácter biológico como las técnicas respirométricas (Burés, 1997).

La clasificación de un sustrato también se hace con base en su naturaleza, la cual se puede clasificar en orgánica e inorgánica debido a la gran variabilidad de los materiales.

2.3.2.4. Sustratos orgánicos

En general la mayoría de los libros especializados en sustratos han establecido la siguiente clasificación:

- De origen natural. Los materiales orgánicos de origen natural están sujetos a descomposición biológica en general, pueden ser utilizados como sustratos después de sufrir una serie de procesos biológicos de transformación artificial, por ejemplo mediante el compostaje, o bien natural, como el caso de las turbas.
- De síntesis. Los materiales orgánicos de síntesis son polímeros orgánicos no biodegradables que se suelen obtener mediante procesos químicos, como el poliestireno o las espumas de poliuretano, que por sus características muchas veces se clasifican erróneamente como inorgánicos (Pastor, 1998).

2.3.2.5. Sustratos inorgánicos

- De origen natural. Se obtiene a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables. Ejemplos de éstos son arena, grava y tierra volcánica.
- Transformados o tratados industrialmente. A partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos, -y a veces también químicos-, más o menos complejos, que modifican notablemente las características de los materiales de partida. Entre los sustratos tratados industrialmente destacan la perlita, la lana de roca, la vermiculita y la arcilla expandida.
- Residuos y subproductos industriales. Comprende los materiales procedentes de muy distintas actividades industriales como escorias de horno alta, estiércoles del carbón, etc. (Urrestarazu, 2000).

2.3.3. Caracterización de sustratos

El mejor sustrato de cultivo para cada caso concreto, variará de acuerdo con numerosos factores: tipo de material vegetal con el que se trabajan (semillas, plantas, estacas, etc.), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego y fertilización, aspectos económicos, entre otros. (Urrestarazu, 2000).

Las propiedades de tipo físico resultan de enorme importancia para el correcto desarrollo de la planta; cabe señalar que una vez colocada ésta en el contenedor resulta prácticamente imposible modificar sus parámetros físicos iniciales. Algo contrario ocurre con las propiedades de tipo químico, que pueden resultar modificables mediante técnicas de cultivo adecuadas.

Para evaluar las características de retención de humedad y capacidad de aireación de los sustratos hortícolas, De Boodt *et al.* (1974) introdujeron el uso de la curva característica de retención de humedad de los medios muy porosos. Según Pire y Pereira (2003) para obtener buenos resultados se requiere que un sustrato tenga las siguientes características:

- Debe ser suficientemente denso y firme para sostener en un sitio las plantas o estacas, durante la germinación o el enraizamiento. Su volumen debe ser constante tanto si está húmedo como seco.
- Debe retener suficiente humedad, para que el riego no sea muy frecuente.
- Debe ser suficientemente poroso para que el exceso de agua drene del mismo, permitiendo la entrada de oxígeno a las raíces.
- Debe tener un bajo contenido de sales (OIRSA, 2005).

2.3.3.1. Uso de sustratos en caña de azúcar

Las plantas propagadas *in vitro* generalmente presentan un mayor crecimiento y vigor, produciendo semillas de alta calidad. Un factor de gran importancia en la reproducción es el coeficiente de multiplicación que se alcanza con la micro propagación, pudiéndose obtener numerosas plantas a partir de un solo meristemo, en cuestión de varios meses. Para caña de azúcar, se plantea la posibilidad de obtener 10, 000 plantas por año, a partir de un meristemo (Santana *et al.*, 1992).

Svartz *et al.* (2004) estudiaron el efecto del bagazo de caña mezclado con suelo y resaca de río en diferentes proporciones usadas como sustrato en el cultivo del geranio. Cuando el bagazo de caña se empleó como componente de mezclas que contenían, hasta 37.5% las plantas de geranio obtuvieron mayor número de ramificaciones e inflorescencias y apropiado aspecto ornamental.

Díaz *et al.* (2004) evaluaron la aclimatación de vitroplantas de caña de azúcar usando lombricomposta, y reportaron que el uso de ésta como parte de los sustratos favorece la aclimatación al incrementarse la longitud de raíces y el número final de plantas que sobrevivieron. La altura de vástago no fue influenciada por la adición de composta. No obstante, el crecimiento alcanzado por las plántulas permitió su crecimiento autotrófico.

Lorenzo (2002), menciona que las combinaciones de sustratos logran mejores resultados en la aclimatación que cuando se emplean individualmente ya que de esta forma se consiguen las características físicas y químicas óptimas.

Galindo *et al.* (2008) realizaron experimentos donde incluyeron sustratos como la cachaza y suelo, además de inocular con *Azotobacter* a éstos, encontraron que los tratamientos a base de cachaza al 100%, independientemente del empleo de *Azotobacter*, presentaron los mejores resultados en el número de hojas y con mayor influencia en la altura con respecto al resto de los tratamientos.

De acuerdo con las referencias anteriores, es claro que no se ha realizado investigación sobre los diversos materiales provenientes de la actividad agrícola que pueden ser usados como sustratos; en particular para la aclimatación de vitroplantas. En esta investigación se propone usar como sustrato subproductos agrícolas los cuales generalmente se consideran como desechos generados dentro de los procesos productivos de los cultivos de caña y arroz; mismos que pueden tener un gran potencial durante la aclimatación de vitroplántulas.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Caracterizar y evaluar el efecto de sustratos conteniendo residuos agrícolas, en la aclimatación y calidad de vitroplantas de las variedades de caña de azúcar MEX 69290 y CP 722086.

3.2. Objetivos particulares

- Caracterizar física y químicamente tres sustratos consistentes en la combinación de tezontle con residuos agrícolas (bagazo de caña, cascarilla de arroz y cachaza).
- Evaluar el efecto de tres mezclas de sustratos en la supervivencia y crecimiento de vitroplantas de las variedades de caña de azúcar MEX 69290 y CP 722086.
- Evaluar el efecto de tres mezclas de sustratos empleados para la aclimatación de vitroplantas de caña de azúcar de las variedades MEX 69290 y CP 722086, sobre parámetros de calidad (contenido de carbohidratos, concentración y extracción de nutrimentos).

IV. HIPÓTESIS

4.1. Hipótesis general

Los sustratos empleados en la investigación tienen efectos diferenciales sobre la aclimatación y calidad de vitroplantas de las variedades de caña de azúcar MEX 69290 y CP 722086.

4.2. Hipótesis particulares

- Las características físico-químicas de los sustratos empleados son distintas.
- Las tres mezclas de sustratos empleadas en esta investigación, tienen efectos diferenciales sobre parámetros de aclimatación como supervivencia y crecimiento de vitroplantas de dos variedades de caña de azúcar.
- Las tres mezclas de sustratos empleadas en esta investigación, tienen efectos diferenciales sobre parámetros de calidad como contenido de carbohidratos, proteínas y nutrimentos, en vitroplantas de caña de azúcar.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Material vegetal

Se utilizaron vitroplantas de caña de azúcar de las variedades MEX 69290 y CP 722086. La Variedad MEX 69290 se caracteriza por tener tallos completos de 3 m, con una longitud del tallo industrializable de 1.9 m; posee en promedio 6.7 tallos y 15 entrenudos; el diámetro del tallo es de 2.8 cm y el valor de grados Brix es de 18.9 (Gutiérrez-Miceli *et al.*, 2006); tiene un porcentaje de floración en el estrato medio de 4.7% (Comparini, 2006). La variedad CP 722086 tiene tallos superiores a los 3 m de longitud, con un diámetro ente 2.5 y 3 cm (Aldana, 2006); el valor de grados Brix en esta variedad es de 17 y presenta un 14.8% de floración en el estrato medio (Comparini, 2006).

5.2. Tratamientos

Los tratamientos evaluados son el resultado de la combinación de tres niveles del factor sustrato y dos niveles del factor variedad, como se describe en el **Cuadro 2**. La forma de preparación de los sustratos es descrita posteriormente.

Cuadro 2. Tratamientos evaluados

Tratamiento	Nivel del factor SUSTRATO	Nivel del factor VARIEDAD
1	Tezontle + Bagazo (TBZ)	MEX 69290
2	Tezontle + Bagazo (TBZ)	CP 722086
3	Tezontle + Cascarilla de arroz (TCA)	MEX 69290
4	Tezontle + Cascarilla de arroz (TCA)	CP 722086
5	Tezontle + Cachaza (TCZ)	MEX 69290
6	Tezontle + Cachaza (TCZ)	CP 722086

Los tratamientos consistieron en la mezcla de diferentes residuos agrícolas con tezontle de granulometría de 5 mm. La mezcla fue en proporción 40:60 (v/v, tezontle/residuo agrícola). Los residuos agrícolas empleados fueron los siguientes:

- 1) Bagazo de caña

El bagazo de caña es el residuo del tallo que queda después del exprimido. En su estado fresco y húmedo produce un residuo de jugo que es susceptible de ser

fermentado por levaduras, la temperatura favorece el crecimiento de especies de hongos. Cuando el bagazo está viejo y seco se enmohece y puede contener grandes cantidades de esporas que pueden causar daños a la salud humana (Basanta *et al.*, 2007). El bagazo de caña tiene la función de alivianador en las mezclas. De acuerdo a su caracterización física, el bagazo de caña modifica la porosidad total y la porción de fracciones gruesas de poros (mayores de 100 μm). (Svartz *et al.*, 2004).

2) Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un subproducto del proceso de molienda de arroz, y un gran recurso como materia prima para el valor añadido manufacturero de productos compuestos (Park *et al.*, 2003). La cascarilla de arroz es un sustrato inerte con baja retención de humedad y de nutrimentos (Álvarez-Herrera *et al.*, 2007).

3) Cachaza

La cachaza es un residuo de la industrialización de la caña de azúcar, compuesto por sacarosa, azúcares simples, coloides coagulados, cera, fibra de caña, partículas de suelo y una importante presencia de elementos minerales (Maccio, 2007). Se producen de 30 a 50 kg por Mg de materia prima procesada, lo cual representa entre 3 y 5% de la caña molida. Este porcentaje y su composición varían con las características agroecológicas de la zona, con el cultivar cosechado, eficiencia de fábrica, método de clarificación empleado, entre otros factores. La cachaza generalmente es rica en fósforo, calcio y nitrógeno y pobre en potasio (Zérega, 1993).

Los subproductos agrícolas fueron secados en estufa de aire forzado hasta alcanzar peso constante y posteriormente se molieron en un molino de acero inoxidable tipo Willey; se mezclaron con las partículas de tezontle en la relación antes indicada. Las mezclas se esterilizaron en una autoclave por 20 min a una temperatura de 120 °C y 150 kPa de presión.

5.3. Ubicación del experimento y condiciones experimentales

La investigación se realizó en un invernadero tipo cenital de estructura metálica y plástico blanco lechoso calibre 720, del área de Nutrición Vegetal del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados. En el invernadero se midió intensidad

luminosa, temperatura y humedad relativa. Para hacer estas determinaciones se utilizaron termógrafos programados que dieron tres lecturas diarias.

5.4. Diseño experimental y de tratamientos

Se realizó un experimento con un arreglo factorial 3 x 2 (Sustratos x Variedades) en un diseño completamente al azar con 50 repeticiones por tratamiento. De éstas, 30 se utilizaron en la evaluación realizada a los 30 días y las 20 restantes, en la evaluación efectuada a los 60 días.

5.5. Análisis de las mezclas de sustratos

5.5.1. Análisis químico

En el extracto de saturación proveniente de cada uno de los sustratos evaluados se analizaron las concentraciones de los nutrientes P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, B y Na en solución empleando un equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción con plasma acoplado (Equipo ICP-AES VARIAN™ Liberty II). El N se determinó por el método Semimicro-Kjeldahl.

En el extracto de saturación también se determinaron adicionalmente la conductividad eléctrica (CE) y el pH. Para obtención del extracto de saturación se colocaron 250 mL del sustrato (medido en probetas) secado a temperatura ambiente, posteriormente fueron saturados con agua destilada hasta obtener un espejo de agua, se dejó reposar por un periodo de 24 h. Transcurrido el tiempo se midió el pH directamente del sustrato saturado con un potenciómetro Conductronic PC18. El extracto se filtró para la determinación de la conductividad eléctrica.

5.5.2. Caracterización física de los sustratos

5.5.2.1. Curvas de retención de humedad

De Boodt, Verdonck y Cappaert desarrollaron a principios de los años 70 la “curva de liberación de agua para sustratos orgánicos”, basándose en establecer tensiones a los sustratos situados en embudos de Haines mediante un sistema de vasos comunicantes. Ellos fijaron los límites de esta curva entre 0 y 100 cm de tensión y definieron la nomenclatura que en la actualidad sigue vigente en

numerosos laboratorios para clasificar el agua de un sustrato (Burés, 1997) y que se describe a continuación:

- Agua difícilmente disponible (ADD): es el agua, en porcentaje en volumen, que queda retenida en el sustrato tras aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua.
- Agua de reserva (AR): es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 50 y 100 cm de columna de agua de tensión sobre el sustrato.
- Agua fácilmente disponible (AFD): es el tanto por ciento en volumen de agua que se libera entre 10 y 50 cm de tensión en columna de agua sobre el sustrato.
- Capacidad de aire (CA): es el porcentaje en volumen de agua que se libera al aplicar una tensión de 10 cm en la columna de agua sobre el sustrato, o por ciento de aire que queda en el sustrato a una tensión de 10 cm de columna de agua.
- Material sólido (MS): es el porcentaje en volumen ocupado por la materia sólida del sustrato.
- Espacio poroso total (EPT): es el espacio de aire y agua, formado por la suma de ADD, AR, AFD y CA y que se determina a partir de las densidades real y aparente.

En los tres sustratos se determinaron las curvas de retención de humedad mediante el método del embudo de placa filtrante (Ansorena, 1994) como se describe a continuación.

Para la obtención de los datos para generar la curva característica de humedad los sustratos fueron saturados en recipientes de 500 mL por un periodo de 24 h, posteriormente se tomó una muestra representativa del sustrato saturado y se pesó. El resto fue colocado en un equipo de succión con embudos de placa filtrante de porosidad número 4.

Después de colocadas las muestras fueron selladas con plástico transparente para impedir la entrada de aire; en este momento las muestras se encontraban bajo una tensión de 0, transcurridas 24 h la tensión se modificó a 10 cm, posteriormente a 50 cm y finalmente a 100 cm de columna de agua. Entre cada

cambio de tensión se tomaba una muestra representativa del sustrato se colocaba en un recipiente de aluminio previamente tarado y se pesaba para poder ser llevado a la estufa donde permanecieron a una temperatura constante de 70 °C durante un periodo de 24 h. Al finalizar el tiempo se pesó nuevamente la muestra con el objetivo de obtener por diferencia de peso la humedad perdida bajo cada tensión. Esta determinación se realizó en el Laboratorio de Física de Suelos ubicado en el edificio de Edafología e Hidrociencias del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

5.5.2.2. Relaciones masa volumen

En la interacción de las tres fases de un sustrato (sólida, líquida y gaseosa) se puede cuantificar la cantidad de cada una de estas a través de la masa y el volumen de las mismas, la proporción de una fase dada en una unidad de volumen del sustrato y la tasa de cambio de la masa y el volumen en el espacio y tiempo (Figuroa, 2009). A partir de estas relaciones podemos calcular características muy importantes como:

ρ_a^w : densidad aparente en suelo húmedo $(M_s + M_w) / V_t$

ρ_a^d : densidad aparente en suelo seco (M_s / V_t)

θ_g : humedad gravimétrica (M_w / M_s)

θ_v : humedad volumétrica $(V_w / V_t) o (\rho_a^d / \rho_w)^* \theta_g$

ϕ_{min} : fracción mineral

ϕ_{org} : fracción orgánica

ϕ_s : fracción de sólidos del sustrato $(\phi_{min} + \phi_{org})$

ϕ_g : $(f - \theta_v)$

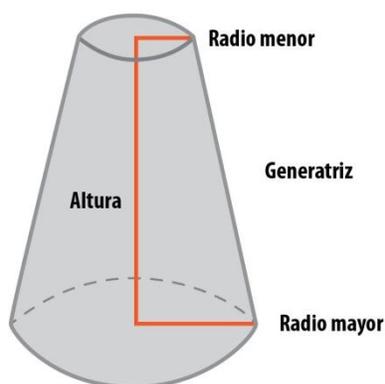
ρ_s : densidad real (M_s / V_s)

Para realizar las determinaciones antes citadas se llenaron 10 recipientes idénticos a los que se usaron en el experimento a una misma altura. El llenado de los recipientes se estandarizó procurando llenar con el mismo volumen de sustrato y compactándolo de la manera más uniforme posible.

Se determinaron las dimensiones del recipiente hasta la altura donde se llenó con el sustrato, usando un vernier. Posteriormente se vació el sustrato contenido en los vasos a recipientes de aluminio previamente identificados y tarados. Se pesaron los recipientes de aluminio más el sustrato para obtener el peso húmedo y se llevaron a la estufa por un periodo de 24 h a una temperatura de 105 °C; transcurrido este periodo se volvieron a pesar para obtener el peso seco.

Para obtener el volumen del sustrato contenido en los vasos de plástico se usó la fórmula de un cono truncado:

$$V = \frac{1}{3} * \pi * h(R^2 + r^2 + R * r)$$



Dónde:

r es el radio menor del vaso en cm;

R es el radio mayor del recipiente a la altura de la muestra; y

h es la altura del sustrato dentro del vaso en cm.

Para determinar el contenido de materia orgánica (M. O.) se pesó una cantidad representativa de cada sustrato en crisoles previamente secados y tarados; posteriormente, las muestras se llevaron a una mufla donde se mantuvieron durante un periodo de 5 h a una temperatura de 500 °C. Al finalizar el tiempo indicado y después del enfriamiento se pesaron nuevamente. Para determinar el porcentaje de materia orgánica se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ M.O.} = (\text{Peso inicial del sustrato} - \text{Peso final}) / \text{Peso inicial del sustrato}$$

La densidad real de los sustratos fue determinada por el método del picnómetro, consistió en pesar una cantidad determinada de sustrato en un matraz con enrase a volumen conocido, se añadió agua destilada hasta saturar el sustrato y se enrasó a volumen. Por diferencia de peso se calculó el volumen de agua añadido; la diferencia corresponde al volumen real del sustrato. El cociente entre el peso del sustrato y el volumen nos proporciona la densidad real.

5.6. Instalación del experimento

Las plantas provenientes de cultivo *in vitro* fueron lavadas con agua destilada. Posteriormente se midió su altura (considerándola altura inicial) y se colocaron en vasos de plástico del número 7 L los cuales contenían las mezclas respectivas de los sustratos esterilizados y ya saturados. Cada recipiente contó con 5 agujeros en la parte inferior para permitir un drenaje adecuado después de los riegos; la altura de llenado fue de 5 cm, el llenado fue de acuerdo al procedimiento descrito en el punto relaciones masa volumen.

Durante los primeros 15 días las plantas se destaparon a partir de las 8 hasta 11 am y después se volvían a tapar en las horas donde la temperatura aumentaba, con la finalidad de mantener una humedad relativa lo más cercana al 100% en esta fase crítica de la aclimatación. Transcurrido este periodo se destaparon definitivamente.

Con respecto a los riegos, éstos se realizaron con base en el peso inicial determinado (peso de recipientes con las mezclas de sustratos saturados y drenados), que es considerado como el 100% de humedad. Posteriormente se realizaban pesadas aleatoriamente para obtener el porcentaje de humedad perdida en cada tratamiento. Con estas relaciones y haciendo uso de reglas de tres se mantuvieron las plántulas los primeros 15 días con un 100% de humedad y el tiempo restante con un 80% de humedad en los sustratos.

5.7. Variables respuesta

5.7.1. Supervivencia de vitroplantas

La supervivencia de vitroplantas fue evaluada a los 15 y 30 días después de iniciado el experimento.

5.7.2. Altura de vitroplantas

Se determinó la altura de las vitroplantas a los 30 y 60 días después de iniciada la fase de aclimatación.

5.7.3. Diámetro de tallo de vitroplantas

Se evaluó usando un vernier digital a los 30 y 60 días de iniciada la fase de aclimatación.

5.7.4. Biomasa seca

El peso de biomasa se evaluó a los 30 y 60 días de iniciada la fase de aclimatación, separando la parte aérea (vástago) y el sistema radical.

5.7.5. Azúcares solubles totales

Los azúcares solubles totales se determinaron en la raíz y en vástago 60 días después del establecimiento de las vitroplantas en los sustratos. Los azúcares fueron determinados mediante el método de antrona descrito por Southgate (1976), y se cuantificaron en un espectrofotómetro GENESYS 10 v2.100 a una longitud de onda 600 nm.

5.7.6. Concentración nutrimental.

En vástago y raíces se determinaron las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn y B. El contenido de nitrógeno total se determinó empleando el método Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965) utilizando ácido sulfúrico-salicílico para su digestión. La determinación de P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn y B se realizó mediante digestión húmeda del material seco con una mezcla de ácidos perclórico y nítrico (Alcántar y Sandoval, 1999). La lectura de los extractos obtenidos después de la digestión y filtrado se determinaron en el equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción por plasma acoplado ICP-AES VARIAN™ modelo Liberty II.

5.8. Análisis estadísticos

Los datos fueron analizados mediante el procedimiento ANOVA del programa SAS 2009 y se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 95%.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Análisis químico de los sustratos

6.1.1. pH y conductividad eléctrica

El intervalo óptimo de valor de pH para sustratos oscila de 5.2 y 6.03, mientras que el valor óptimo de CE va de 0.75 a 3.49 dS m⁻¹ (Abad *et al.*, 1992 citado por Ansorena, 1994).

En el **Cuadro 3** se presentan los resultados obtenidos en la determinación de pH y CE de los sustratos.

Cuadro 3. Valores iniciales de pH y CE en los sustratos utilizados en la aclimatación de vitroplantas de caña de azúcar. TBZ: Tezontle + bagazo de caña; TCA: Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ: Tezontle + cachaza.

Sustrato	pH	CE (dS m ⁻¹)
TBZ	6.85	0.41
TCA	5.78	0.93
TCZ	8.41	0.22

Estos resultados muestran que los valores de pH de TBZ y TCA se encuentran dentro del intervalo óptimo; en el caso de TCZ el pH (8.41) se encuentra en un valor más alto, lo cual nos sugiere que en este sustrato podríamos tener problemas de disponibilidad de algunos nutrimentos además de mencionar que el pH óptimo para la caña de azúcar es de 6.5. La conductividad eléctrica se encuentra por debajo del intervalo óptimo para el caso de las mezclas TCZ y TBZ, la excepción fue el sustrato TCA con un valor de CE dentro del óptimo. El cultivo de caña de azúcar comienza a ser afectado por sales cuando la conductividad eléctrica en el extracto saturado del suelo sobrepasa los 6 dS m⁻¹ (Dappo, 1975; Zerega, 1991).

6.1.2. Contenido nutrimental

En el **Cuadro 4** se muestran los niveles óptimos de contenido nutrimental para sustratos reportados en la literatura. Los resultados de concentración nutrimental de los sustratos evaluados se presentan en el **Cuadro 5**.

Cuadro 4. Niveles óptimos de contenido nutrimental para los sustratos de cultivo (Abad *et al.* 1992 citado por Ansorena, 1994).

Nutrimento	Concentración óptima
	g kg ⁻¹
N-NO ₃ ⁻	0.100-0.199
N-NH ₄ ⁺	0.000-0.020
P	0.0060-0.010
K	0.150-0.249
Ca	>0.200
Mg	> 0.070
	mg kg ⁻¹
Fe	0.300-3.000
Cu	0.001-0.050
Zn	0.300-3.000
Mn	0.020-3.000
B	0.005-0.500
Mo	0.010-0.100

Cuadro 5. Concentraciones nutrimentales en los extractos de saturación de los sustratos conteniendo residuos agrícolas. TBZ: Tezontle + bagazo de caña; TCA: Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ: Tezontle + cachaza.

Sustrato	N	P	K	Ca	Mg
	%	g kg ⁻¹			
TBZ	0.092	0.010	0.055	0.062	0.053
TCA	1.302	0.027	0.255	0.025	0.050
TCZ	0.748	0.011	0.176	0.077	0.063
Sustrato	Fe	Zn	Mn	B	Na
	mg kg ⁻¹				
TBZ	0.916	0.000	1.485	0.000	19.230
TCA	0.174	0.058	6.944	0.121	11.920
TCZ	0.184	0.000	0.043	0.000	14.230

Las concentraciones de N, P, Ca y Mg en los tres sustratos evaluados se encuentran por debajo del intervalo reportado como óptimo para sustratos. No obstante, es importante destacar que los valores registrados de Mg se encuentran

muy cercanos al óptimo. Las concentraciones de K en los sustratos conteniendo cascarilla de arroz y cachaza (TCA y TCZ, respectivamente) son reportados como adecuados. En lo que respecta a micronutrientes, las concentraciones de Fe en los tres sustratos se clasifican como óptimas, mientras que las del Zn son bajas. La concentración de Mn es la que mostró mayor variabilidad entre sustratos; siendo óptima en los sustratos con bagazo (TBZ) y cachaza (TCZ). En el sustrato con cascarilla de arroz (TCA), la concentración de este elemento es superior en más del doble al óptimo.

6.2. Caracterización física de los sustratos

Se han definido intervalos de referencia (óptimos) para propiedades físicas de los sustratos de cultivo (**Cuadro 6**), los cuales son de gran utilidad para poder definir la aptitud de un sustrato para ser utilizado en cultivos agrícolas.

Cuadro 6. Niveles óptimos para las propiedades físicas de los sustratos de cultivo (Ababet *et al.*, 1992; Ansorena, 1994).

Propiedad	Nivel óptimo
Densidad aparente (g cm^{-3})	< 0.4
Densidad real (g cm^{-3})	1.45-2-65
Espacio poroso total (% del volumen)	> 85
Retención de agua (% en volumen) a:	
10 cm	55 a 70
50 cm	31 a 40
100 cm	25 a 31
Capacidad de aireación (% en volumen)	10 a 30
Agua fácilmente disponible (% del volumen)	20 a 30
Agua de reserva (% en volumen)	4 a 10
Agua total disponible (% en volumen)	24 a 40

Las curvas de retención de humedad obtenidas en la evaluación de los tres sustratos analizados se presentan en la **Figura 1**. Por otra parte, los valores de los parámetros AND, AFD, AR y ADD en cada sustrato son mostrados en el **Cuadro 7**.

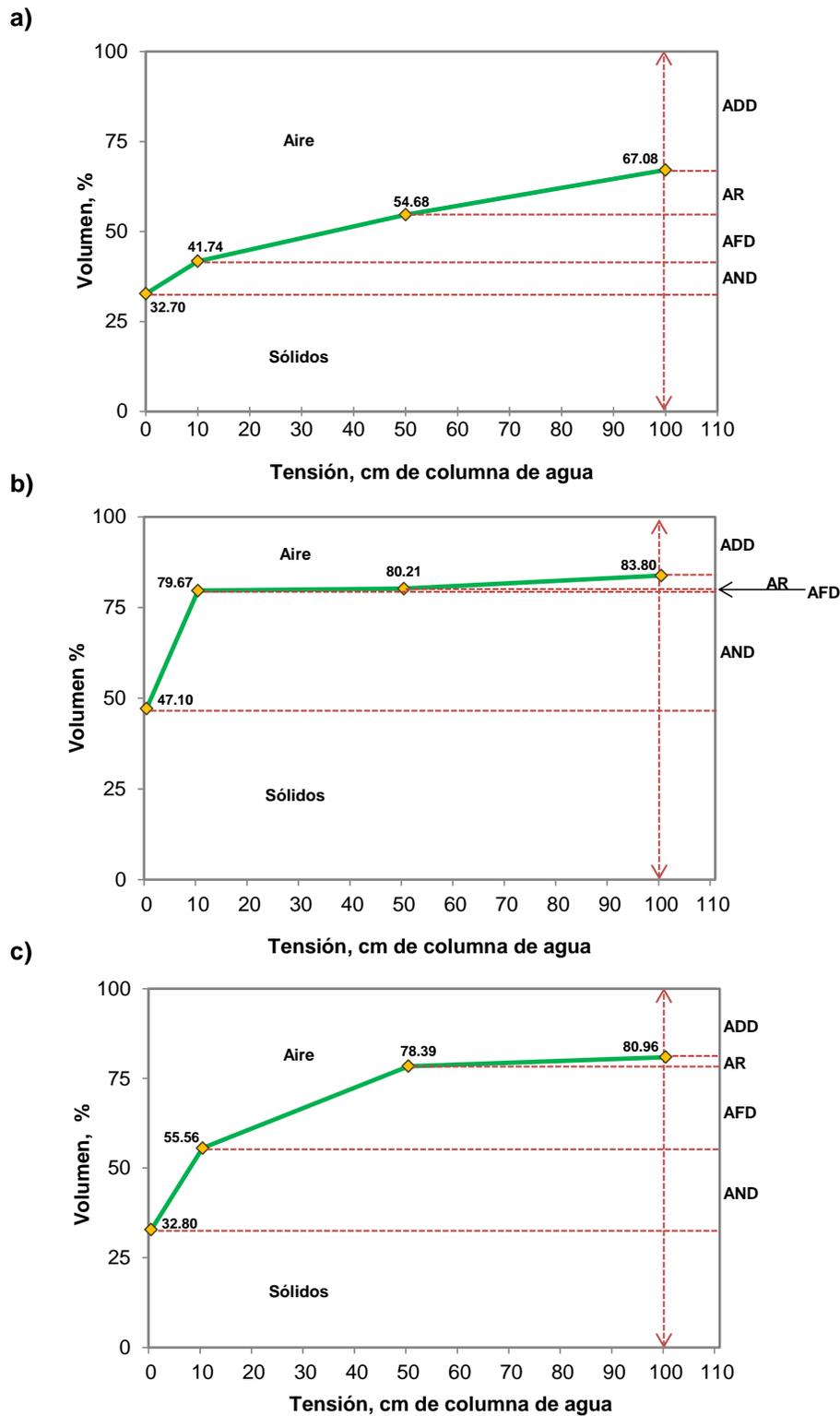


Figura 1. Curva característica de humedad de los sustratos. (a) Tezontle + bagazo de caña (TBZ); (b) Tezontle + cascarilla de arroz (TCA) y (c) Tezontle + cachaza (TCZ).

ADD: Agua difícilmente disponible, AR: Agua de reserva, AFD: Agua fácilmente disponible, AND: Agua no disponible.

En lo que respecta a los porcentajes de retención de agua a una tensión de 10 cm, se encontró que el sustrato TBZ tiene un valor estimado por debajo del intervalo óptimo mientras que el sustrato TCA presenta un valor ligeramente por encima de lo establecido, siendo la mezcla TCZ la que presenta el único valor dentro del intervalo óptimo para esta tensión de acuerdo a lo observado en el **Cuadro 6**. En lo referente a tensiones de 50 y 100 cm de columna de agua en la **Figura 1**, muestra que los valores en los tres tratamientos se encuentran por arriba de los deseables. En los intervalos de AFD (agua fácilmente disponible) es evidente que éstos son más amplios en las **Figuras 1a** y **1c** (sustratos TBZ y TCZ, respectivamente), ya que la curva se muestra de manera ascendente; mientras que, en la **Figura 1b** (TCA), el intervalo de AFD es muy reducido.

Sólo el sustrato conteniendo tezontle y cachaza (TCZ) tiene un porcentaje de agua fácilmente disponible dentro del intervalo de referencia (**Cuadro 6**). No obstante, es pertinente indicar que el valor de esta variable se encuentra muy cercana al límite inferior del intervalo. Los dos sustratos restantes (TBZ y TCA) tienen porcentajes de agua fácilmente disponibles inferiores a los deseables (**Cuadro 7**).

En lo que al agua de reserva respecta, ninguno de los sustratos evaluados cumple los intervalos de referencia. Por un lado el sustrato conteniendo bagazo de caña (TBZ) presenta un valor superior a los óptimos; por el otro, los sustratos TCA y TCZ presentan porcentajes de agua de reserva menores a los niveles recomendados (**Cuadros 6 y 7**).

Cuadro 7. Parámetros de la curva de retención de humedad determinados en tres sustratos TBZ: tezontle + bagazo de caña; TCA: tezontle + cascarilla de arroz y TCZ: tezontle + cachaza.

Sustrato	Agua no disponible (AND)	Agua fácilmente disponible (AFD)	Agua de reserva (AR)	Agua difícilmente disponible (ADD)
	%			
TBZ	9.04	12.94	12.40	32.92
TCA	32.57	0.54	3.59	16.20
TCZ	22.76	22.83	2.57	19.04

En el **Cuadro 8** se presentan el resto de parámetros físicos determinados en los tres sustratos estudiados en esta investigación.

Cuadro 8. Caracterización física de los tres sustratos conteniendo residuos agrícolas.

Sustrato	${}^w\rho_a$	${}^d\rho_a$	ρ_s	θ_g	θ_v	ϕ_{min}	ϕ_{org}	ϕ_s	ϕ_g	$f(\%)$
		$g\ cm^{-3}$		$kg\ kg^{-1}$	$m^3\ m^{-3}$	(%)	(%)	(%)	(%)	
TBZ	0.399	0.387	2.390	0.029	0.008	0.167	0.160	0.327	0.665	67.27
TCA	0.380	0.360	2.007	0.029	0.011	0.170	0.300	0.471	0.518	52.92
TCZ	0.282	0.274	1.658	0.068	0.025	0.198	0.130	0.328	0.646	67.19

${}^w\rho_a$: Densidad aparente en sustrato húmedo $(M_s + M_w) / V_t$; ${}^d\rho_a$: Densidad aparente en sustrato seco (M_s/V_t) ; ρ_s : densidad real (M_s/V_s) ; θ_g : humedad gravimétrica (M_w/M_s) ; θ_v : humedad volumétrica (V_w/V_t) o $({}^d\rho_a/\rho_w) * \theta_g$; ϕ_{min} : fracción mineral; ϕ_{org} : fracción orgánica; ϕ_s : fracción de sólidos del sustrato $(\phi_{min} + \phi_{org})$; ϕ_g : $(f - \theta_v)$; $f(\%)$: Porosidad. TBZ: Tezontle + bagazo de caña, TCA: Tezontle + cascarilla de arroz y TCZ: Tezontle + cachaza.

De acuerdo a los valores de referencia indicados en el **Cuadro 6**, tanto la densidad aparente como la real de los tres sustratos evaluados son consideradas dentro de los intervalos óptimos. Los porcentajes de aeración se encuentran por debajo de lo deseado, aunque alcanzan una clasificación de aceptables (**Cuadro 8**). La aireación en los sustratos es necesaria para favorecer la máxima absorción de nutrientes por las raíces. Un suplemento inadecuado de oxígeno tiene una influencia negativa sobre la absorción de nutrientes como N, P, K, Ca, Mg, Cl, B, Zn, Cu, Mn y Fe. (Kirkham, 1987 citado por Díaz *et al.*, 2004). Pire y Pereira (2003) reportan para la cascarilla de arroz y el bagazo de caña altos valores de porosidad total y bajos para densidad aparente y de partículas.

6.3. Variables de aclimatación

6.3.1. Supervivencia

La supervivencia de las plántulas fue evaluada a los 15 y 30 días después de instalado el experimento.

Barra y Mogollón (2007) al aclimatar vitroplantas de *Etilingera hemisphaerica* obtuvieron resultados por encima del 90% de supervivencia de plántulas a los 15

días de iniciada la aclimatación en todos sus tratamientos, a los 30 días los porcentajes disminuyeron aunque se mantuvieron superiores al 80%.

En el **Cuadro 9** se presenta el efecto de la interacción de los factores de estudio (sustrato y variedad) sobre la sobrevivencia de vitroplantas. La sobrevivencia de las vitroplantas a los 30 días osciló entre el 64 y 98%, observándose el menor porcentaje de sobrevivencia en la variedad CP 722086 en el sustrato TCZ. En el sustrato conteniendo cascarilla de arroz (TCA) con ambas variedades y en el sustrato conteniendo bagazo de caña con la variedad MEX 69290 se registraron los mayores porcentajes de sobrevivencia de vitroplantas de caña de azúcar.

Cuadro 9. Porcentaje de sobrevivencia de plántulas en los días 15, 30 y al finalizar el experimento (60 días).

Tratamiento	% de Sobrevivencia	
	15 días	30 días
TBZ/MEX 69290	100	98
TBZ/CP 722086	96	94
TCA/MEX 69290	98	98
TCA/CP 722086	98	98
TCZ/MEX 69290	92	84
TCZ/CP 722086	64	64

6.3.2. Altura de plántula y diámetro de tallo

La altura de plántula por efecto del factor de estudio sustrato (**Figura 2**) fue siempre superior en el sustrato conteniendo cascarilla de arroz, siendo estadísticamente diferente de los sustratos restantes, tanto a los 30 como a los 60 días después de iniciado el experimento.

La variedad CP722086 presentó un mayor porte en los dos muestres realizados, independientemente del sustrato utilizado. La altura de plántulas de esta variedad fue estadísticamente diferente a la de la variedad MEX 69290 (**Figura 3**).

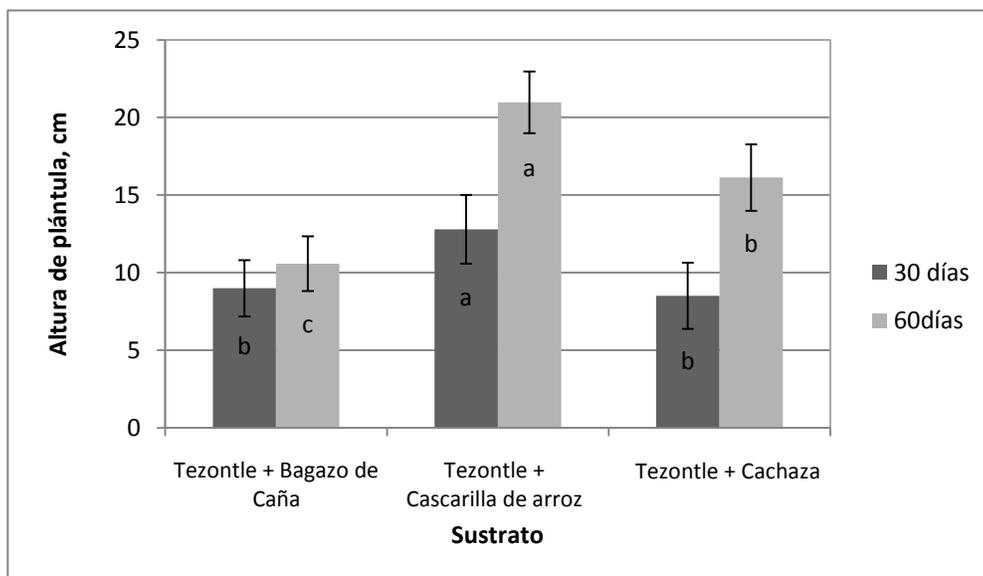


Figura 2. Efecto del factor de estudio “sustrato” sobre la altura de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo realizado, indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

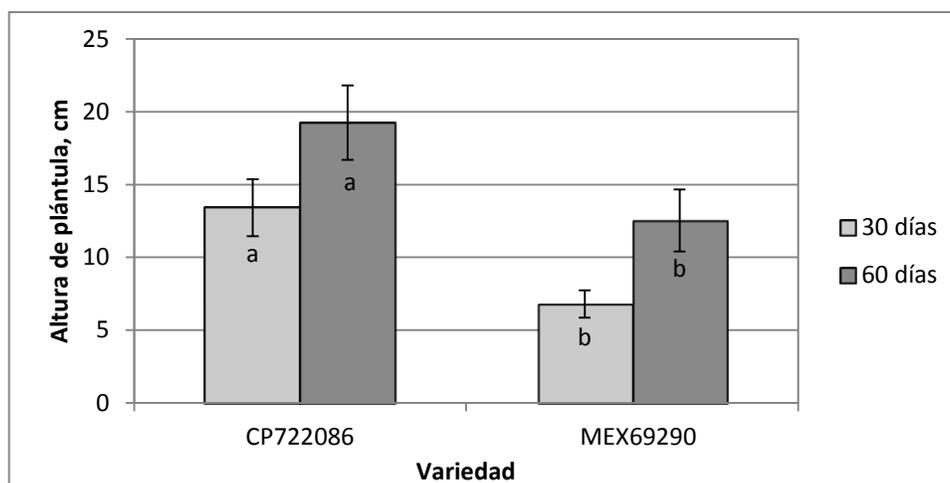


Figura 3. Efecto del factor de estudio “variedad” de caña de azúcar sobre la altura de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo realizado indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

El efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato y variedad para la variable altura de plántula se presenta en la **Figura 4**, donde se observa la media más alta en el sustrato conteniendo cascarilla de arroz y la variedad CP722086. Este tratamiento es estadísticamente diferente al resto y presenta la misma tendencia tanto a los 30 como a los 60 días.

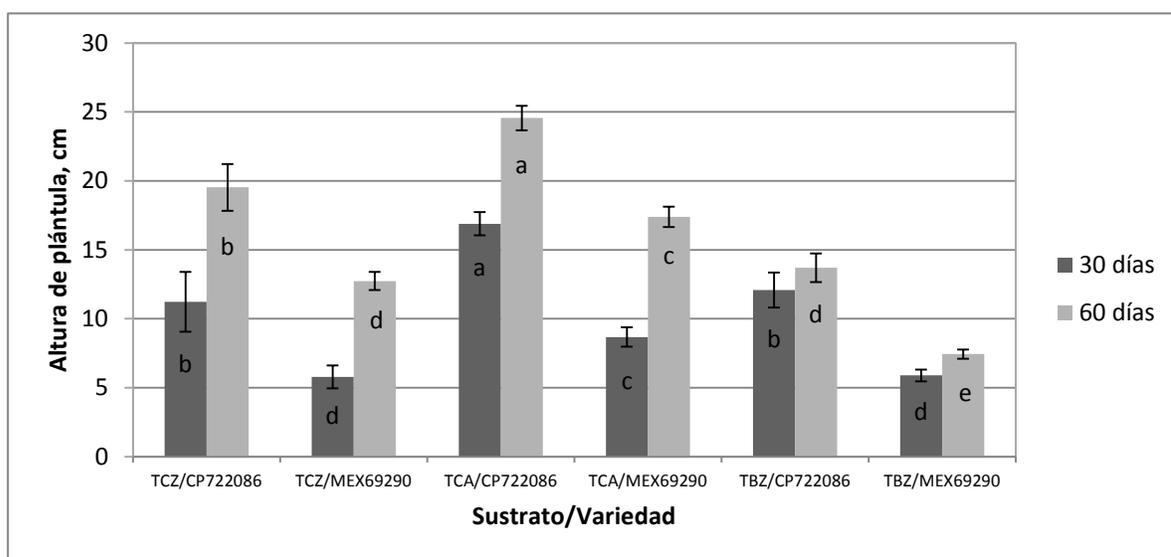


Figura 4. Efecto de la interacción de los factores de estudio “sustrato/variedad” de caña de azúcar sobre la altura de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo realizado indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

El efecto del factor de estudio sustrato sobre el diámetro de tallo se muestra en la **Figura 5**. Se observa que a los 30 días de crecimiento no existen diferencias estadísticas significativas entre los sustratos. En contraste, a los con 60 días de crecimiento, donde el sustrato conteniendo cascarilla de arroz presentó el mejor efecto sobre el diámetro de las plántulas y fue estadísticamente diferente al resto de los sustratos.

Con respecto al factor de estudio variedad de caña de azúcar (**Figura 6**) el diámetro de tallo fue siempre mayor en la variedad CP 722086 tanto a los 30 como a los 60 días de aplicados los tratamientos y fue estadísticamente diferente a los diámetros obtenidos en la variedad MEX 69290 en las dos fechas de muestreo.

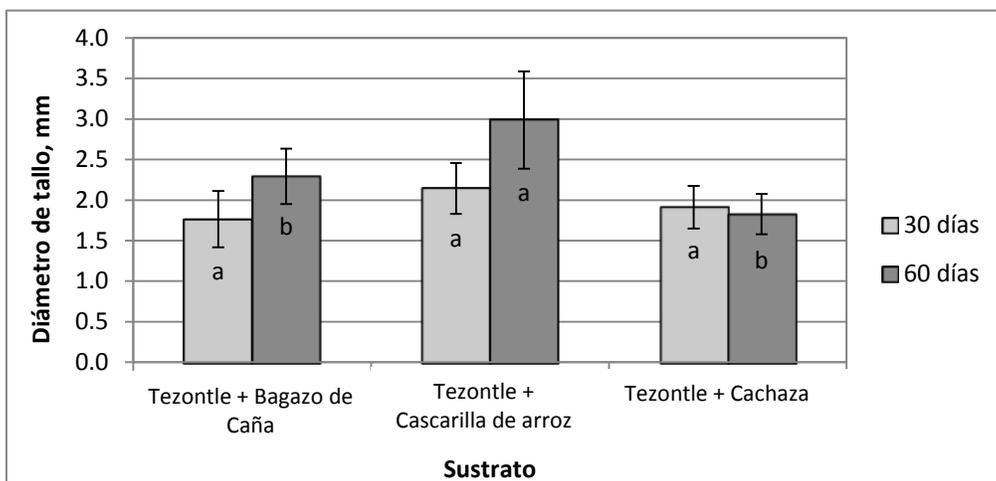


Figura 5. Efecto del factor de estudio sustrato sobre el diámetro de tallo de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo realizado indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

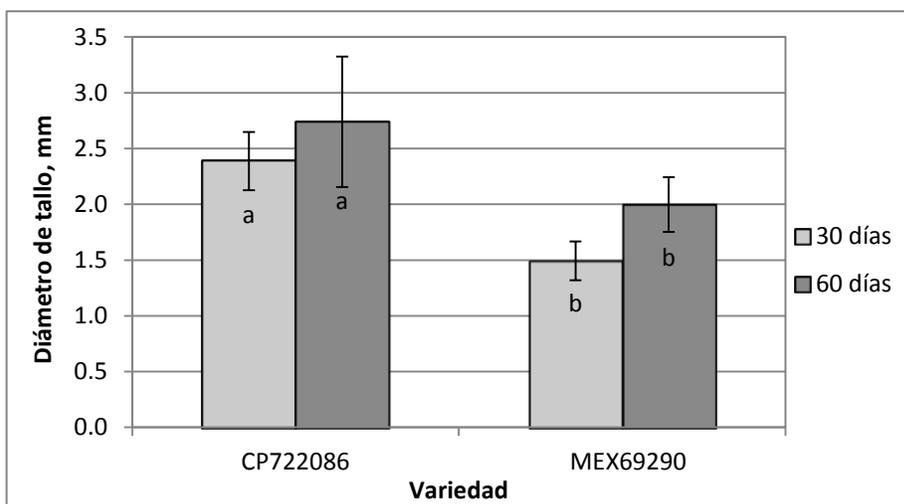


Figura 6. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre el diámetro de tallo de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo realizado indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio (**Figura 7**) a los 30 días se registraron las medias más altas en la variedad CP 722086, independientemente del sustrato utilizado. A los 60 días, las plántulas de la variedad CP 722086 establecidas en el sustrato TCA tuvieron el mayor diámetro de tallo, el cual superó de manera significativa al resto de los tratamientos los cuales no son estadísticamente diferentes.

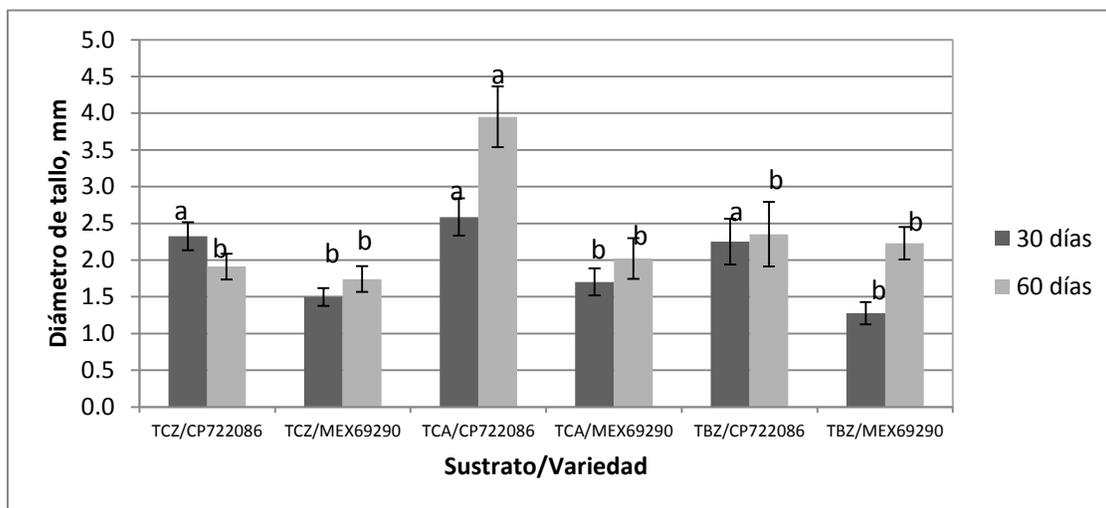


Figura 7. Efecto de los factores de los estudio sustrato/variedad de caña de azúcar sobre el diámetro de tallo de plántulas de caña de azúcar después de 30 y 60 días de establecido el experimento. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo realizado indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

6.5.3. Biomasa a los 30 días

6.5.3.1. Biomasa de vástago

En la **Figura 8** es claro que ninguno de los sustratos evaluados tuvo algún efecto sobre la biomasa de vástago ni en fresco ni seca. No obstante, las medias más altas se registraron en el sustrato conteniendo cascarilla de arroz.

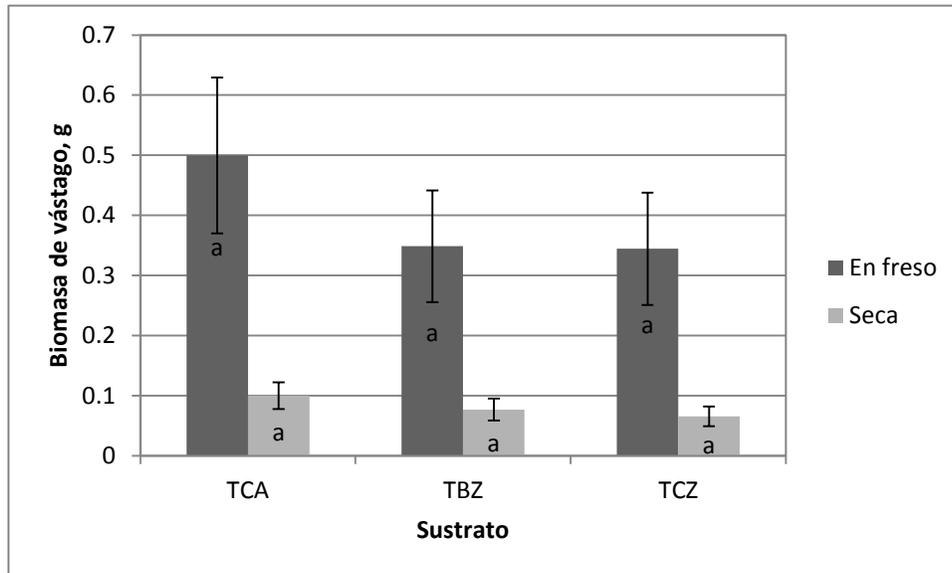


Figura 8. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa en fresco y seca del vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

La biomasa en fresco y seca de los vástagos registrada en el muestreo realizado a los 30 días (**Figura 9**), muestra que la variedad CP722086 fue la que tuvo las medias más altas. Sin embargo, los valores alcanzados en ambos casos (0.54 ± 0.08 y 0.10 ± 0.01) se encuentran por debajo de los encontrados por Rodríguez *et al.* (2000) quienes reportan valores para biomasa fresca y seca a los 35 días de aclimatación en caña de azúcar de 6.68 ± 0.15 y 0.14 ± 0.022 respectivamente, bajo condiciones de densidad de flujo fotónico fotosintético (DFFF) de $4000 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ y 80% de HR.

La biomasa en fresco y seca por efecto de los factores de estudio mostró diferencias estadística significativa, presentándose en ambos casos la media más alta en el sustrato tezontle + cascarilla de arroz y la variedad CP722086 (**Figura 10**).

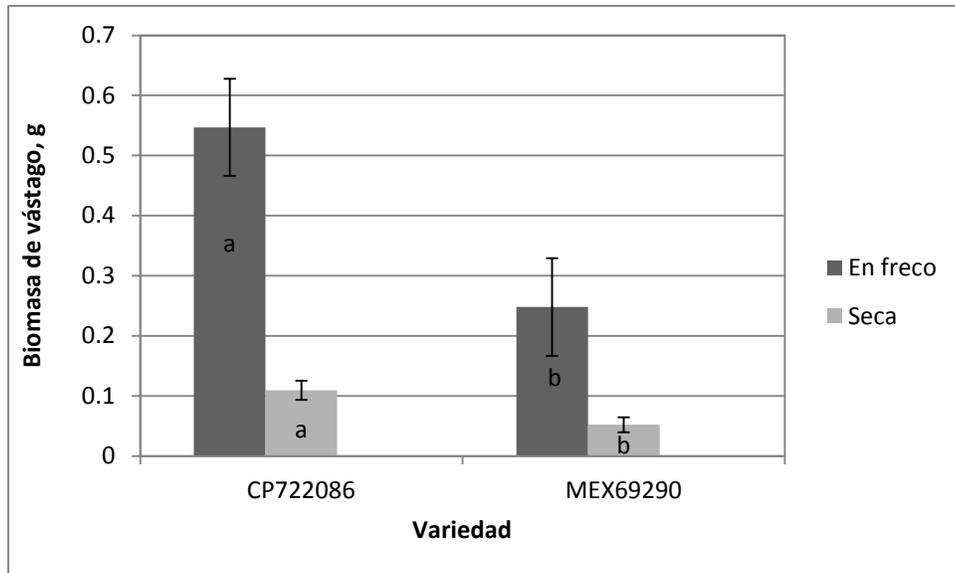


Figura 9. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la biomasa en fresco y seca del vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

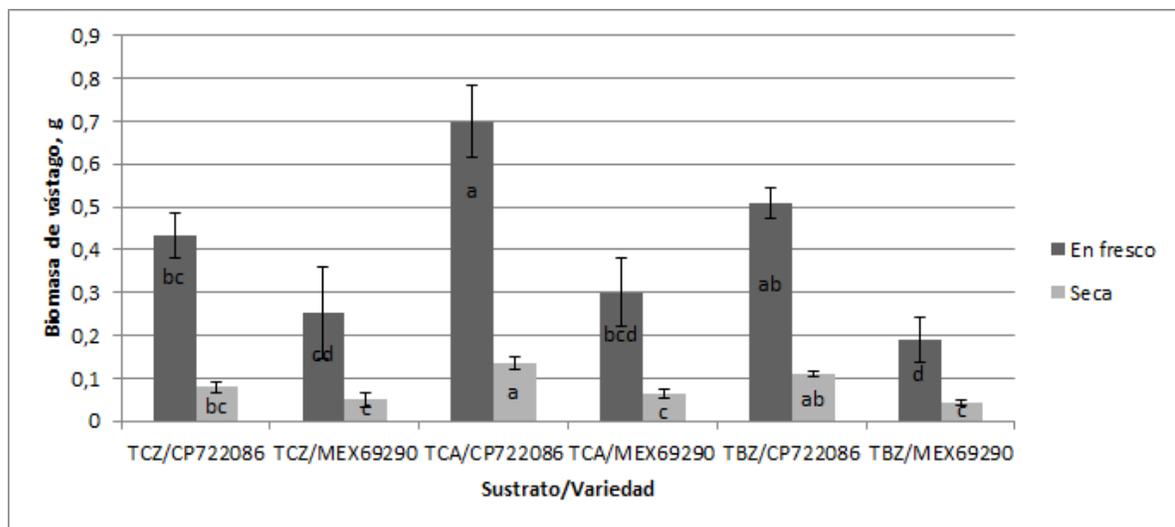


Figura 10. Efecto de los factores de estudio sustrato/variedad de caña de azúcar sobre la biomasa en fresco y seca del vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada fecha de muestreo indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

6.5.3.2. Biomasa de raíz

Los sustratos TCA y TBZ tuvieron un efecto positivo sobre la biomasa de raíz el mayor efecto incrementando inclusive el contenido de materias seca en fresco y seca más que en los vástagos, la mezcla TCZ disminuyó su contenido en raíz tanto en fresco como en seca mostrando diferencia con los otros dos sustratos (Figura 11).

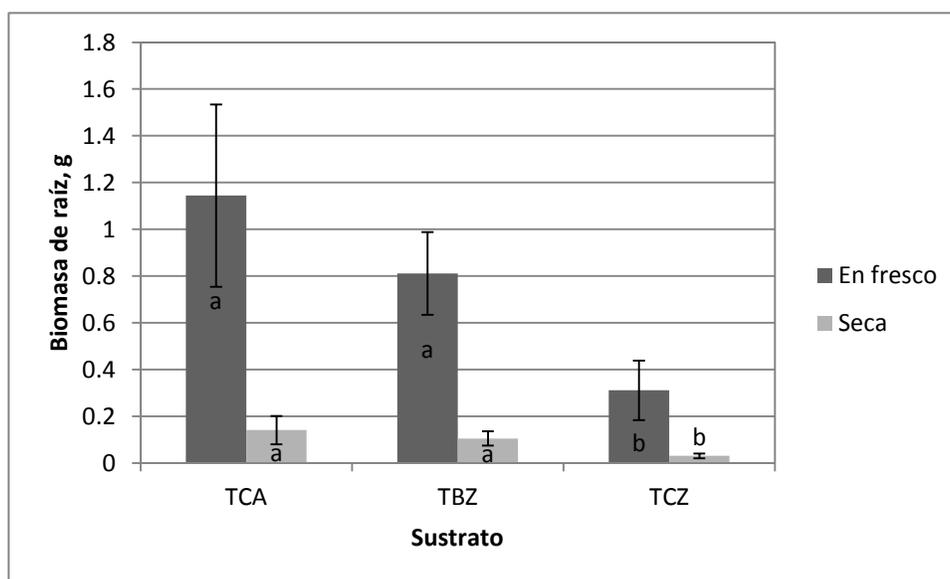


Figura 11. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa de raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada variable indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio en cada variable evaluada (Tukey, $\alpha=0.05$).

La biomasa de raíz a los 30 días (Figura 12) mostró tendencias similares a la observada para biomasa de vástago, tanto en peso en fresco como en seco, al considerar el factor variedad. Al respecto, Sánchez *et al.* (2007) mencionan que la biomasa fresca y seca de las raíces es afectada por el tamaño de las vitroplantas de manera directamente proporcional. Así, utilizando vitroplántulas de *Aloe vera* sin raíces en tamaños de 4, 6 y 11 cm encontraron valores de biomasa fresca y seca

para plantas grandes de 0.31 a 0.048 y en las pequeñas de 0.13 a 0.007 g respectivamente, transcurridas ocho semanas del experimento.

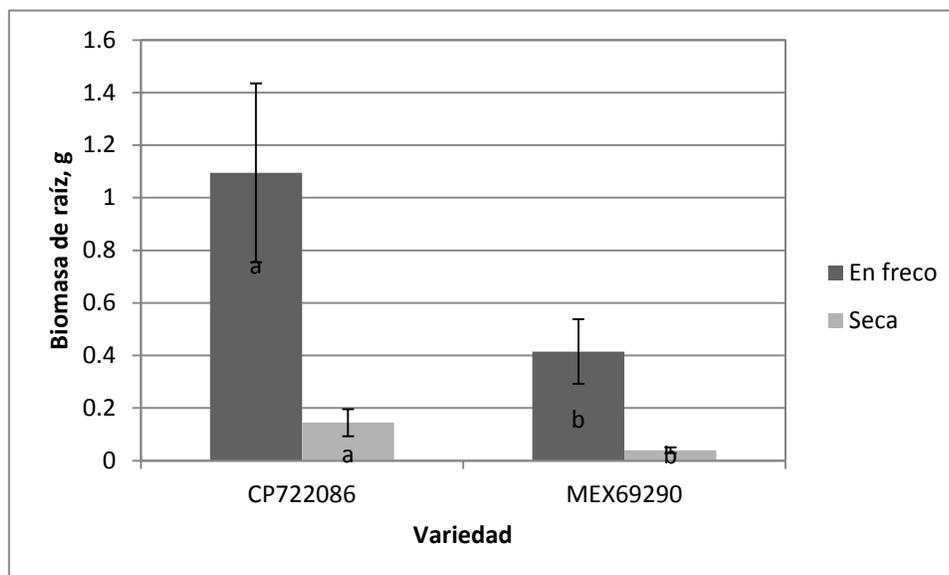


Figura 12. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la biomasa de raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada variable indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio en cada variable evaluada (Tukey, $\alpha=0.05$).

La interacción sustrato/variedad incrementó los contenidos de biomasa en raíz tanto en fresco como en seca, en comparación con la biomasa de los vástagos en el tratamiento TCA/CP722086 (**Figura 13**).

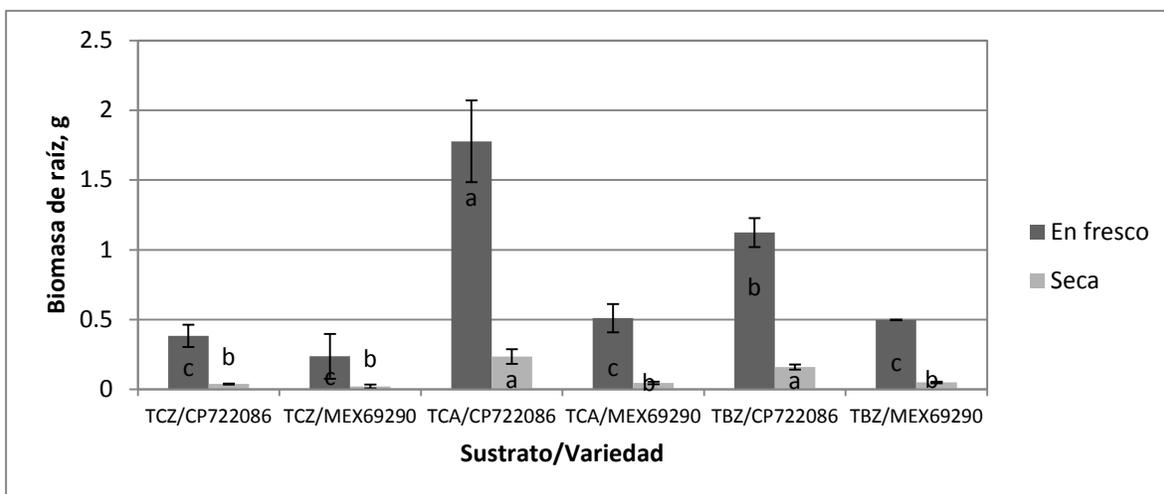


Figura 13. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad de caña de azúcar sobre la biomasa de raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada variable indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio en cada variable evaluada (Tukey, $\alpha=0.05$).

6.5.4. Biomasa a los 60 días

6.5.4.1. Biomasa de vástago

El peso biomasa en vástago por efecto del sustrato (**Figura 14**) a los 60 días, presentó su valor más alto en la mezcla conteniendo cascarilla de arroz tanto para biomasa fresca como seca, siendo en ambos casos estadísticamente diferente de los dos sustratos restantes.

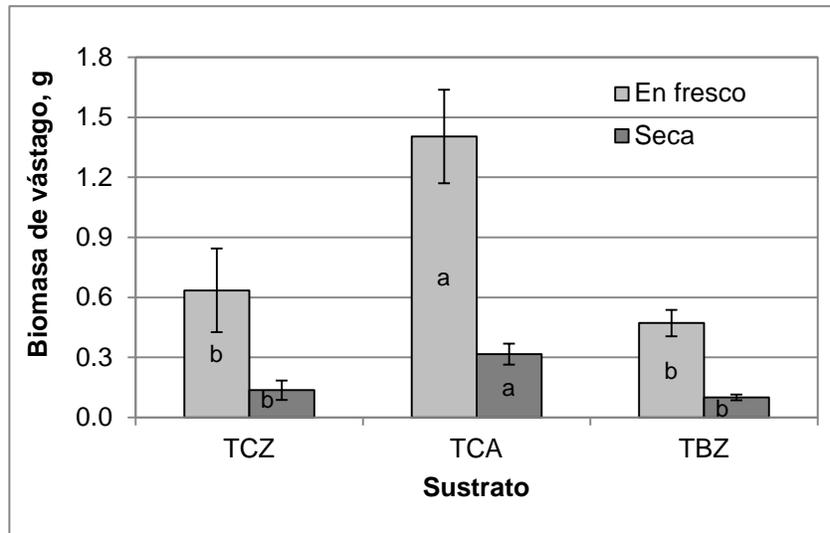


Figura 14. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa en vástago de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Por efecto del factor de estudio variedad, la CP 722086 tuvo mayor contenido de biomasa tanto en fresco como en seco, presentando diferencias estadísticas con los resultados de la variedad MEX 69290 (**Figura 15**). Contrario a esto, Ayala y Valdez (2008) al usar polvo de coco, peatmoss y peat lite como sustratos, en ornamentales, encontraron que los pesos de vástago y de raíz no fueron afectados por efecto de dichos sustratos.

En la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad, el tratamiento TCA/CP722086 tuvo los valores más altos de biomasa seca y fresca observándose diferencias estadísticas entre éste y el resto de los tratamientos (**Figura 16**).

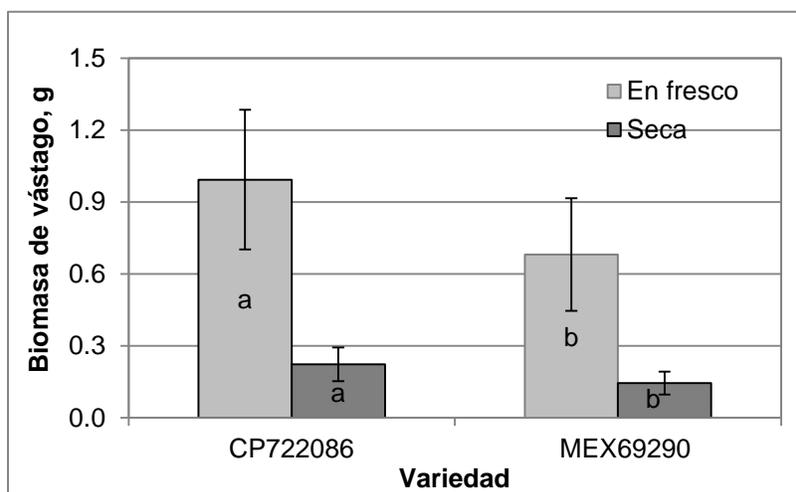


Figura 15. Efecto del factor de estudio variedad sobre la biomasa de vástago de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

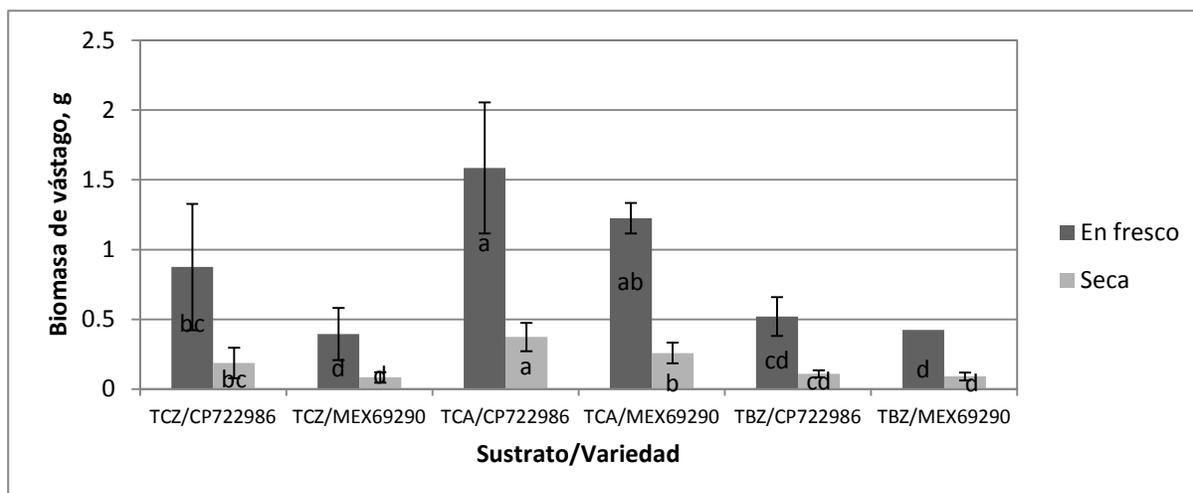


Figura 16. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la biomasa en vástago de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

6.5.4.1. Biomasa de raíz

La **Figura 17** nos muestra la biomasa de raíz a los 60 días por efecto de sustrato; se observan las mismas tendencias que las registradas en biomasa de vástagos,

siendo TCA el sustrato, donde la biomasa fresca y seca obtuvo los valores más altos con respecto al resto de los sustratos, observándose nuevamente valores superiores en biomasa de raíz que en biomasa de vástago.

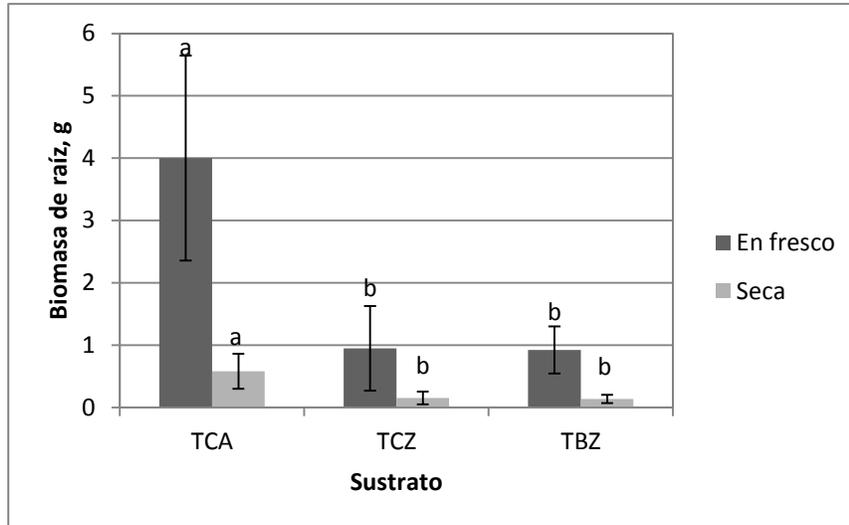


Figura 17. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la biomasa en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

El factor variedad no tuvo efectos sobre el contenido de biomasa en fresco, no así para la biomasa seca donde la variedad CP722086 obtuvo la media más alta. Es importante destacar que los valores obtenidos en biomasa fresca y seca en raíz son mayores a los obtenidos en biomasa fresca y seca de vástagos (**Figura 18**).

En lo referente a la interacción de los factores de estudio, nuevamente el tratamiento con cascarilla de arroz y variedad CP722086 presentó el mayor peso de biomasa fresca y seca en raíz (**Figura 19**); valores muy por encima de los obtenidos para biomasa de vástagos principalmente en peso fresco.

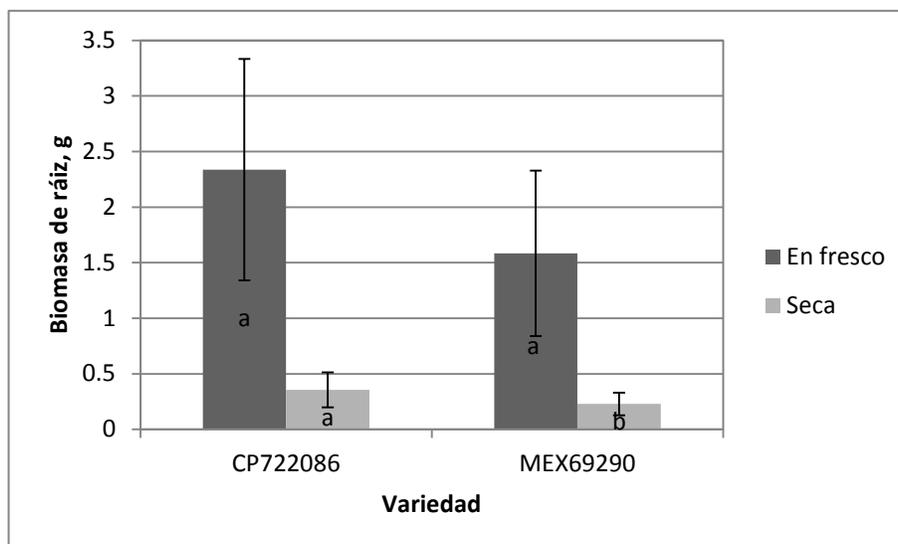


Figura 18. Efecto del factor de estudio variedad sobre la biomasa en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

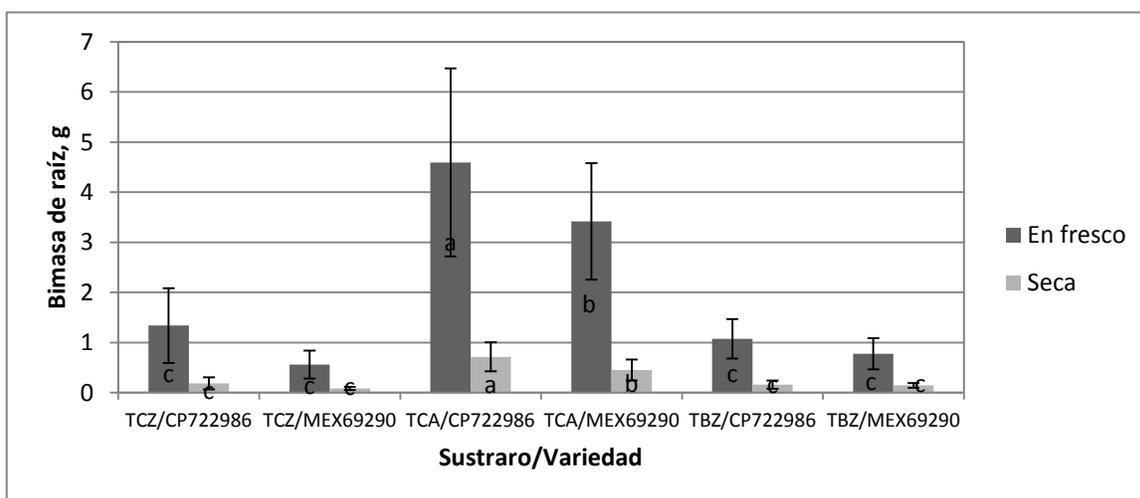


Figura 19. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la biomasa en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

6.5.5. Azúcares solubles totales

Zhu *et al.* (1997) mencionan que la acumulación de azúcares está muy relacionada con la interacción de procesos de síntesis y degradación de la sacarosa.

En la **Figura 20** se presentan las concentraciones de azúcares al finalizar el proceso de aclimatación de las plántulas observándose que no hubo diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos por efecto del sustrato

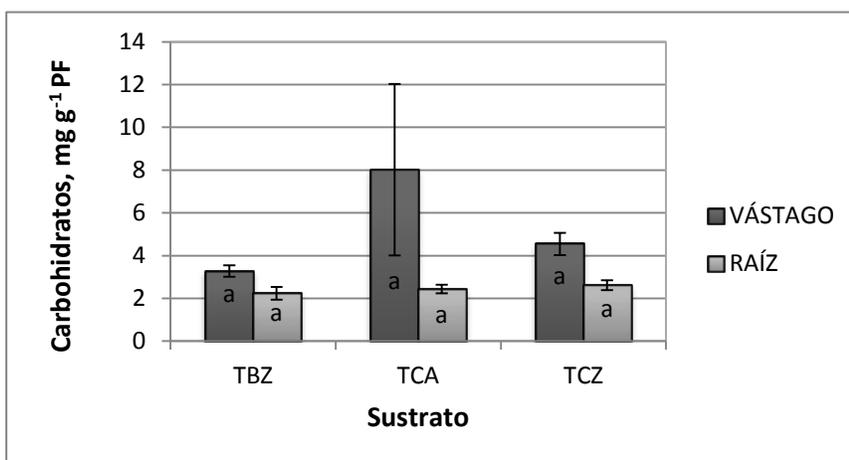


Figura 20. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de azúcares en vástago y raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Asimismo tampoco existió efecto del factor variedad (**Figura 21**) ni de la interacción de ambos (**Figura 22**) sobre la concentración en vástago y raíces de azúcares solubles totales. No obstante, se observa que la concentración de azúcares es mayor en el sustrato conteniendo cascarilla de arroz (**Figura 20**), así como en la variedad MEX69290 (**Figura 21**) y en combinación de estos niveles de los factores de estudio (**Figura 22**).

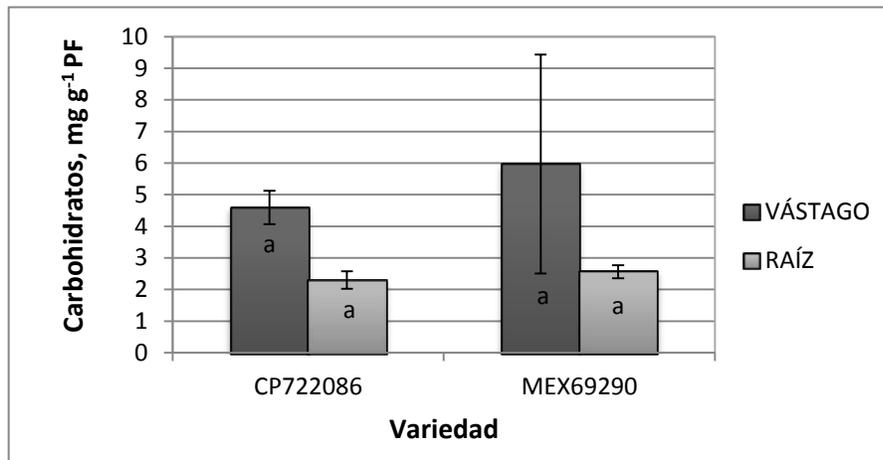


Figura 21. Efecto del factor de estudio variedad sobre la concentración de azúcares en vástago y raíz de plántulas de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada evaluación indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

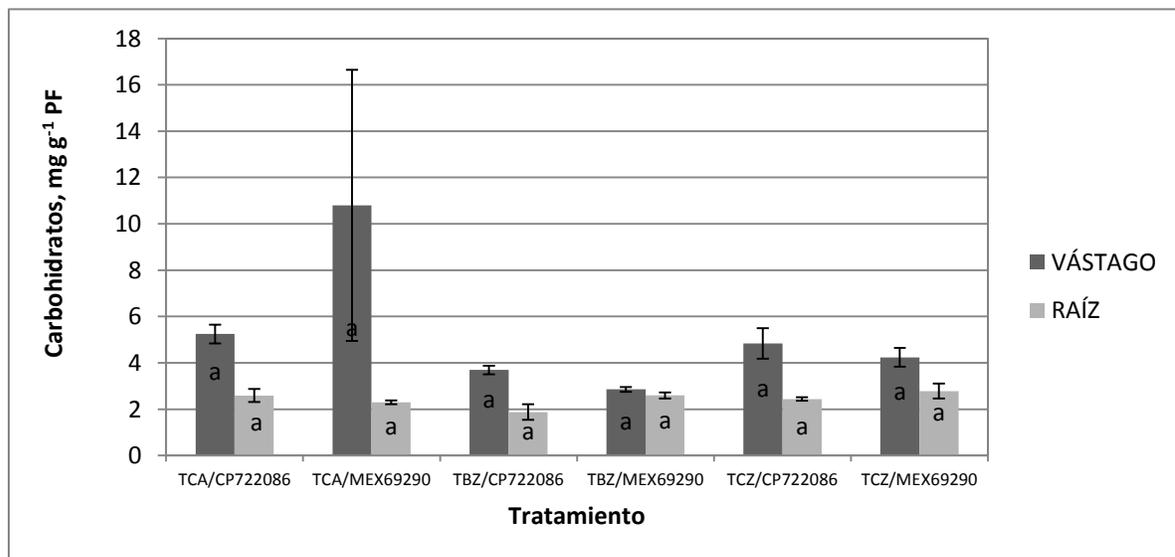


Figura 22. Concentración de azúcares por efecto de los factores de estudio sustrato/ variedad de caña de azúcar en vástago y raíz después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada gráfica indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Es de notarse que la concentración de azúcares siempre fue mayor en la parte aérea (vástago) que en la raíz, Borroto *et al.* (2003) menciona que en entrenudos maduros el contenido de sacarosa puede ser más del 50% del total de la masa fresca.

6.5.6. Concentración nutrimental

La extracción de nutrimentos de los cultivos varía de manera directa con la biomasa que produce, es decir mientras mayor acumulación de materia seca se tenga por unidad de superficie, el cultivo necesitará mayor cantidad de nutrimentos para satisfacer la demanda que genera la biomasa que produce el cultivo de interés (SIAZUCAR, 2009).

6.5.6.1. Concentraciones nutrimentales a los 30 días

6.5.6.1. Nitrógeno

La principal función del N es estimular el crecimiento de la planta, especialmente en la etapa inicial de crecimiento vegetativo generando un alto índice de área foliar y prolongando el periodo útil de las hojas jóvenes a través del tiempo (SIAZUCAR, 2009).

Se presentan sólo los datos del efecto de la interacción, debido a que se evaluó una repetición en la determinación de N, por falta de material vegetal seco. El porcentaje de N en vástago y raíces a los 30 días por efecto de la interacción de los factores de estudio se presenta en la **Figura 23**. No se realizó análisis estadístico en esta variable debido a que no se contaba con muestra suficiente, así los resultados presentados corresponden sólo a una determinación. En vástago, las mayores concentraciones se registraron en los tratamientos TCA/MEX 69290 y TCZ/CP 722086; mientras que, en raíces en el tratamiento TCZ/C0 722086.

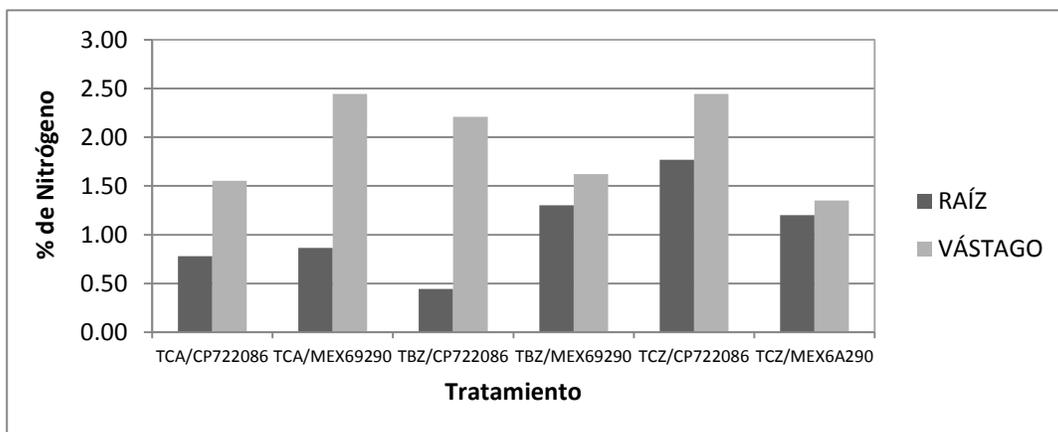


Figura 23. Porcentaje de N a los 30 días después de la aplicación de los tratamientos en raíz y vástago.

6.5.6.1.2. Fósforo, potasio, calcio y magnesio

Por efecto del factor de estudio sustrato (**Figura 24**) no se observaron diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de P, K, Ca y Mg en vástago.

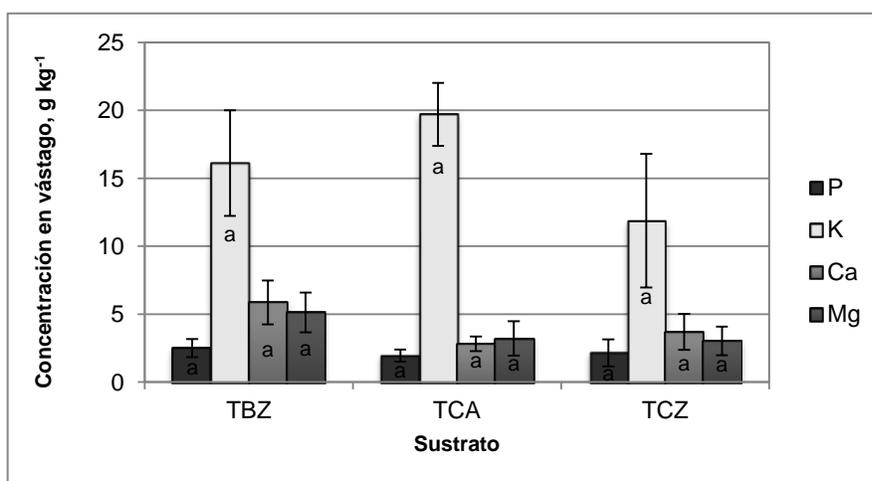


Figura 24. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de P, K, Ca y Mg en vástagos de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

En raíces a los 30 días, sólo la concentración de K mostró diferencias estadísticas significativas por efecto del sustrato, registrándose el valor más alto en el sustrato TCA (**Figura 25**).

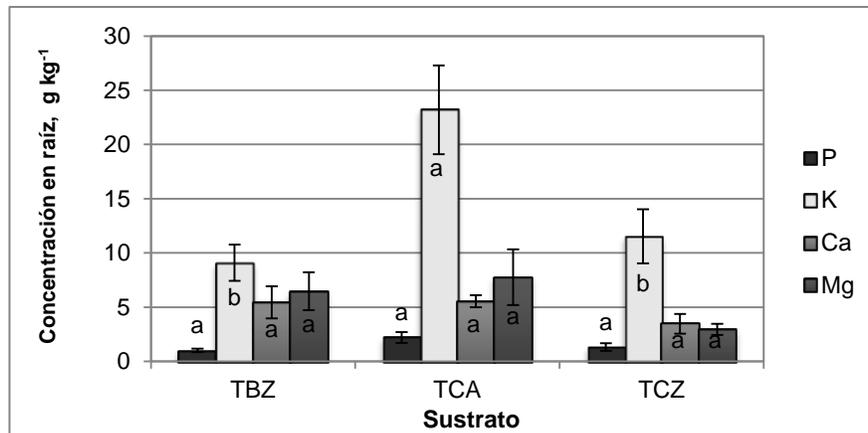


Figura 25. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de P, K, Ca y Mg en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

En lo referente al factor variedad (**Figura 26**), no se observaron efectos significativos sobre el contenido nutrimental en vástago, no así para raíces, donde se observan diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de P y Ca, con las medias más altas en la variedad CP 722086 (**Figura 27**).

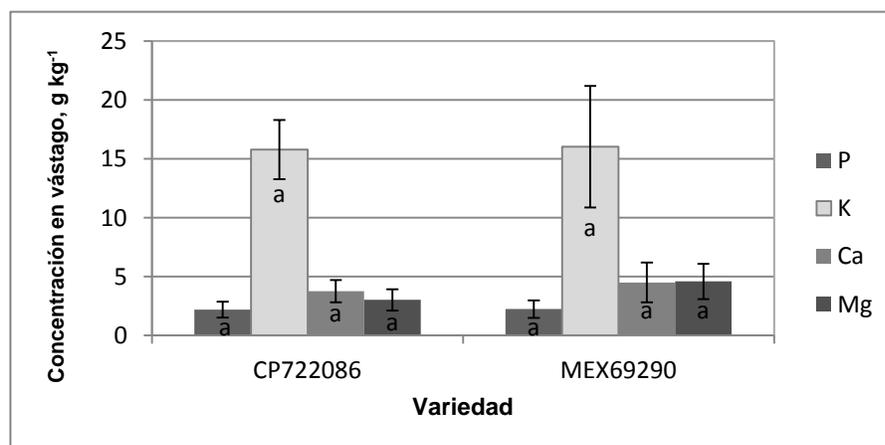


Figura 26. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la concentración nutrimental de P, K, Ca y Mg en vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

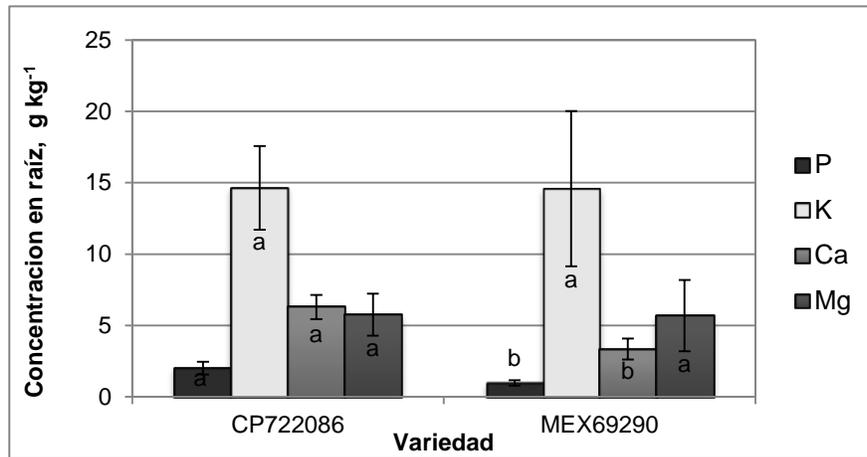


Figura 27. Efecto del factor de estudio variedad de caña de azúcar sobre la concentración de P, K, Ca y Mg en raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

La concentración de P y Mg en vástago, por efecto de la interacción de los factores de estudio no presentó diferencias estadísticas significativas. Por el contrario, las concentraciones de K y Ca sí, presentándose los mayores valores en los tratamientos TCA/MEX69290 y TBZ/MEX69290, respectivamente (**Figura 28**). Las concentraciones de P, K, Ca y Mg resultado de la interacción de los factores de estudio, se presentan en la **Figura 29**. La concentración de P más alta se presentó en el tratamiento TCA/CP722086 y la de Ca en el tratamiento TBZ/CP722086. Las concentraciones de K y Mg no fueron diferentes estadísticamente entre tratamientos.

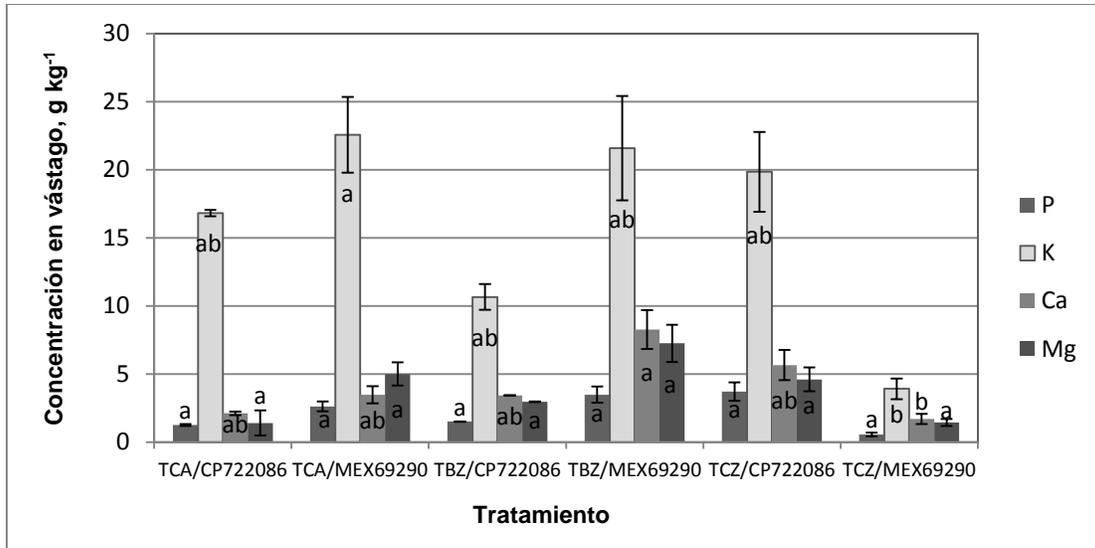


Figura 28. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la concentración nutrimental de P, K, Ca y Mg en vástagos de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada cuadro indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

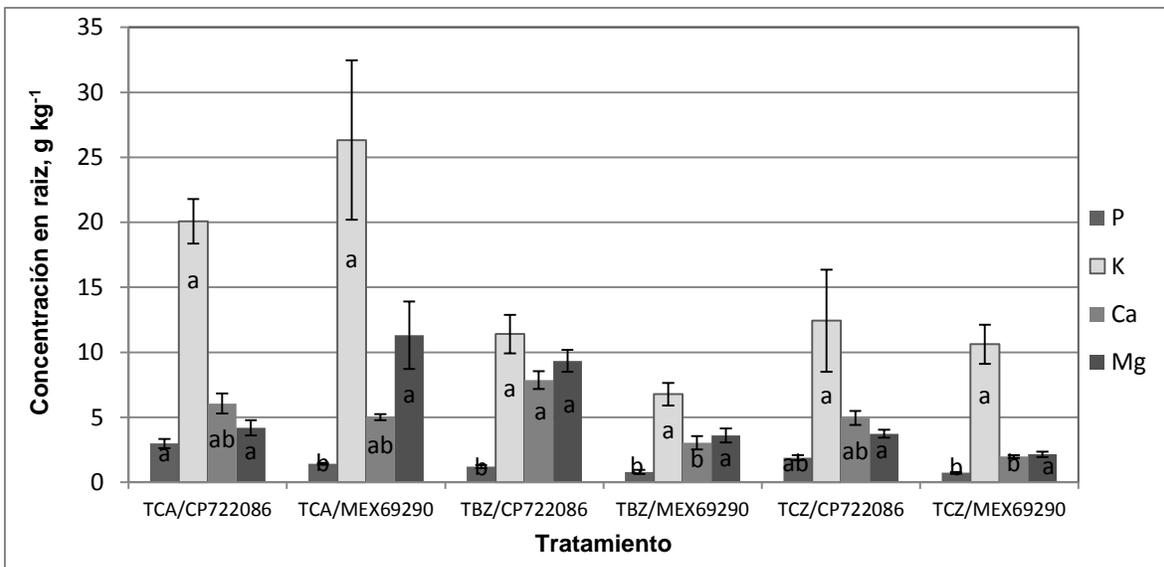


Figura 29. Efecto de la interacción de los factores de estudio sustrato/variedad sobre la concentración nutrimental de P, K, Ca y Mg en raíces de vitroplantas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

6.5.6.1.3. Micronutrientos

En el caso de los micronutrientos a los 30 días, sólo las concentraciones de Na en vástago y de B en raíz registraron diferencias estadísticas significativas por efecto del sustrato utilizado (**Cuadro 10**).

Cuadro 10. Efecto del factor de estudio sustrato sobre la concentración de micronutrientos en raíz y vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.

Sustrato	Fe	Zn	Mn	B	Na
Concentración en vástago, g kg⁻¹					
TBZ	0.894 a ± 0.51	0.048 a ± 0.03	0.126 a ± 0.08	0.175 a ±	4.18 a ± 2.73
TCA	0.661 a ± 0.58	0.055 a ± 0.03	0.751 a ± 1.04	0.160 a ±	1.89 ab ± 0.68
TCZ	0.084 a ± 0.05	0.020 a ± 0.02	0.061 a ± 0.05	0.081 a ±	0.78 b ± 0.50
Concentración en raíz, g kg⁻¹					
TBZ	7.49 a ± 4.94	0.056 a ± 0.014	0.324 a ± 0.015	0.110 b ± 0.002	2.83 a ± 1.01
TCA	3.24 a ± 1.91	0.081 a ± 0.033	0.913 a ± 0.090	0.191 a ± 0.004	4.43 a ± 2.63
TCZ	2.25 a ± 3.50	0.042 a ± 0.014	0.189 a ± 0.010	0.159 ab ± 0.003	1.63 a ± 0.51

Medias ± DE con letras distintas en cada columna para cada órgano, indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

En el **Cuadro 11** se presentan las concentraciones de micronutrientos en vástago y raíces en función de la variedad de caña de azúcar evaluada.

Cuadro 11. Efecto del factor de estudio variedad sobre la concentración de micronutrientos en vástago y raíz de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.

Sustrato	Fe	Zn	Mn	B	Na
Concentración en vástago, g kg⁻¹					
CP722086	0.504 a ± 0.52	0.033 a ± 0.012	0.464 a ± 0.09	0.108 a ± 0.03	1.53a ± 0.52
MEX69290	0.589 a ± 0.60	0.049 a ± 0.036	0.161 a ± 0.13	0.168 a ± 0.12	3.04 a ± 2.84
Concentración en raíz, g kg⁻¹					
CP722086	5.22 a ± 5.07	0.059 a ± 0.014	0.288 a ± 0.14	0.154 b ± 0.042	2.77 a ± 0.87
MEX69290	3.43 a ± 1.30	0.061 a ± 0.033	0.662 a ± 0.080	0.151 a ± 0.052	3.16 a ± 2.69

Medias ± DE con letras distintas en cada columna por órgano indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

La concentración de micronutrientos en vástago y raíz se muestra en el **Cuadro 12**. En vástago, el Na registró la mayor concentración en el tratamiento

TBZ/MEX69290 siendo estadísticamente diferente al resto. Las concentraciones de los micronutrientos restantes no tuvieron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. En raíces, las concentraciones de todos los micronutrientos fueron estadísticamente diferentes entre tratamientos. Las concentraciones de Zn, Mn, B y Na fueron mayores en la interacción de los factores de estudio TCA/MEX6929, mientras que la concentración de Fe fue superior estadísticamente al resto en el tratamiento TBZ/MEX69290. De manera general la concentración de micronutrientos fue mayor en raíces que en parte aérea, independientemente de la variedad de caña de azúcar.

Cuadro 12. Efecto de la interacción de factores de estudio sustrato y variedad de caña de azúcar sobre la concentración de micronutrientos en raíz y vástago de plántulas de caña de azúcar después de 30 días de aplicados los tratamientos.

Tratamiento	Fe	Zn	Mn	B	Na
Concentración en vástago, g kg⁻¹					
TBZ/CP722086	0.53 a ± 0.034	0.029 a ± 0.004	0.070 a ± 0.005	0.098 a ± 0.004	2.06 b ± 0.28
TBZ/MEX69290	1.26 a ± 0.504	0.066 a ± 0.026	0.181 a ± 0.076	0.252 a ± 0.101	6.31 a ± 2.04
TCA/CP722086	0.86 a ± 0.901	0.037 a ± 0.008	1.224 a ± 1.535	0.105 a ± 0.016	1.44 b ± 0.08
TCA/MEX69290	0.46 a ± 0.135	0.074 a ± 0.026	0.277 a ± 0.107	0.214 a ± 0.076	2.34 b ± 0.76
TCZ/CP722086	0.12 a ± 0.043	0.032 a ± 0.021	0.098 a ± 0.044	0.123 a ± 0.052	1.10 b ± 0.57
TCZ/MEX69290	0.05 a ± 0.026	0.008 a ± 0.007	0.025 a ± 0.013	0.039 a ± 0.017	0.46 b ± 0.06
Concentración en raíz, g kg⁻¹					
TBZ/CP722086	11.7 a ± 1.65	0.068 ab ± 0.009	0.445 b ± 0.093	0.113 a ± 0.028	3.68 ab ± 0.28
TBZ/MEX69290	3.3 b ± 0.63	0.046 ab ± 0.006	0.203 b ± 0.052	0.107 a ± 0.028	1.99 ab ± 0.37
TCA/CP722086	1.6 b ± 0.38	0.059 ab ± 0.014	0.147 b ± 0.038	0.177 a ± 0.044	2.65 ab ± 0.84
TCA/MEX69290	4.8 b ± 0.72	0.104 a ± 0.030	1.679 a ± 0.259	0.206 a ± 0.050	6.22 a ± 2.70
TCZ/CP722086	2.4 b ± 0.32	0.052 ab ± 0.012	0.273 b ± 0.051	0.174 a ± 0.033	1.99 ab ± 0.37
TCZ/MEX69290	2.1 b ± 0.47	0.032 b ± 0.003	0.106 b ± 0.019	0.143 a ± 0.018	1.28 b ± 0.39

Medias ± DE con letras distintas en columna por órgano indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Las concentraciones más altas de nutrientes se encontraron en K y Fe en el caso del efecto por factor de estudio (sustrato o variedad) y por la interacción de estos. Lo anterior concuerda con lo encontrado por Velázquez (2008) quien cuantificó la biomasa seca y la extracción nutricional en *Eustoma gradiflorum* Raf. cv. Mariachi siendo K y Fe los nutrientes con mayor extracción.

6.5.6.2. Concentración nutrimental a los 60 días

6.5.6.2.1. Nitrógeno

Las concentraciones más altas de N se encontraron en plantas establecidas en el sustrato que contenían cascarilla de arroz en ambas variedades (**Figura30**). De manera general, se observan valores superiores en los porcentajes de N en raíz que en vástago a excepción de TBZ/CP722086 donde la concentración de N fue mayor en vástago.

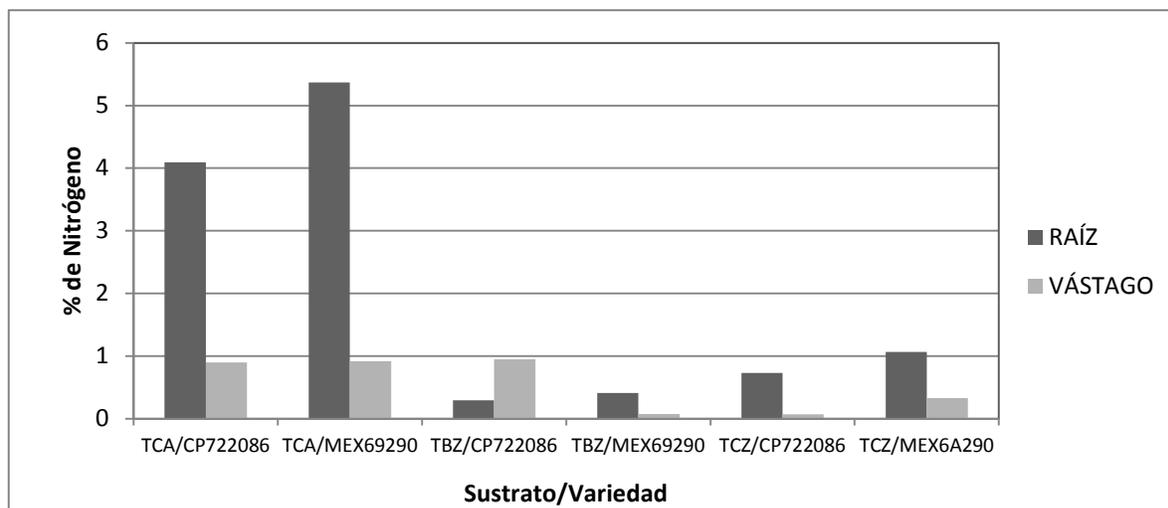


Figura 30. Concentración de N en raíz y vástago a los 60 días después de la aplicación de los tratamientos.

6.5.6.2.2. Fósforo, potasio, calcio y magnesio

Las concentraciones de P, K, Ca y Mg en vástago en función del sustrato empleado son presentadas en la **Figura 31**. La concentración de P fue superior en plantas establecidas en el sustrato TCZ; por el contrario, la de Ca fue superior en el sustrato TBZ. Las concentraciones de K y Mg no fueron estadísticamente diferentes entre los niveles de sustrato.

En la **Figura 32** se observa que la concentración de P, K, Ca y Mg en raíces en función del factor de estudio sustrato. Las concentraciones de P y K fueron superiores en las raíces de plantas establecidas en el sustrato TCZ. Las

concentraciones de Ca y Mg no fueron diferentes estadísticamente entre tratamientos.

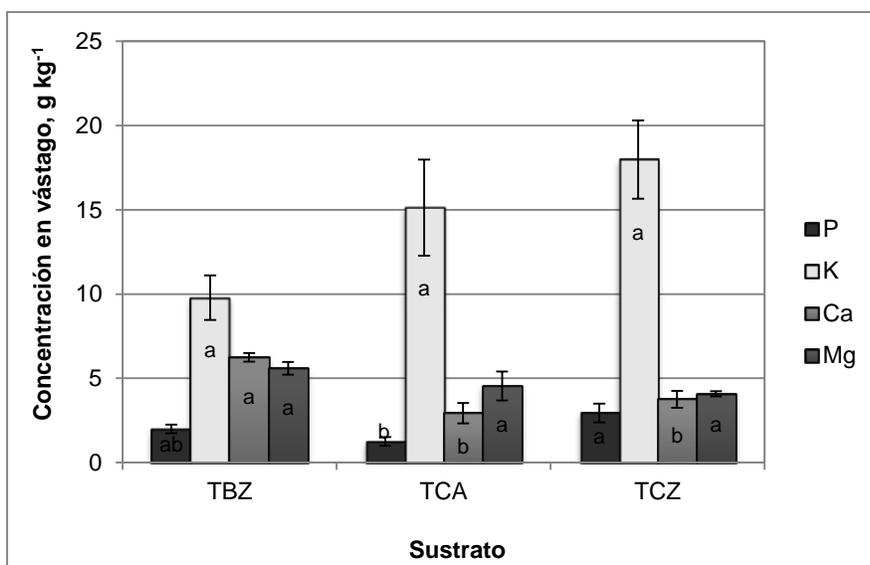


Figura 31. Concentración de P, K, Ca y Mg en vástago por efecto del sustrato después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

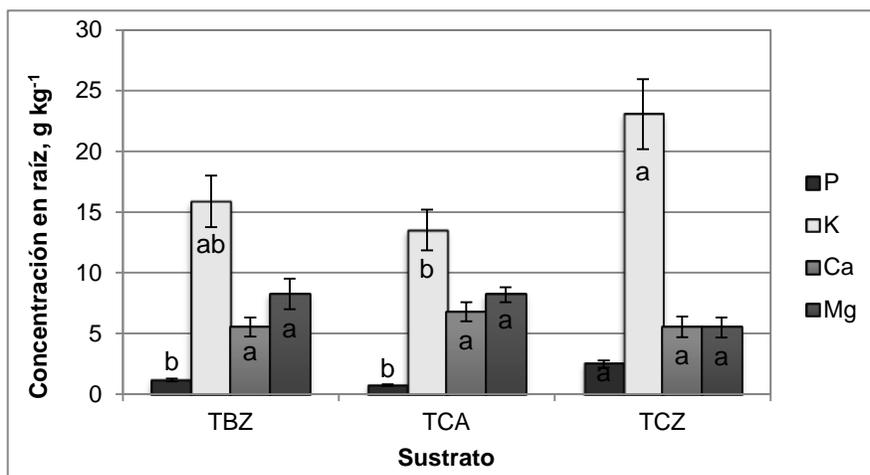


Figura 32. Concentración de P, K, Ca y Mg en raíz por efecto del sustrato después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Las concentraciones de P, K, Ca y Mg en vástago en el muestreo realizado a los 60 días no presentaron diferencia estadística por efecto del sustrato empleado (**Figura 33**).

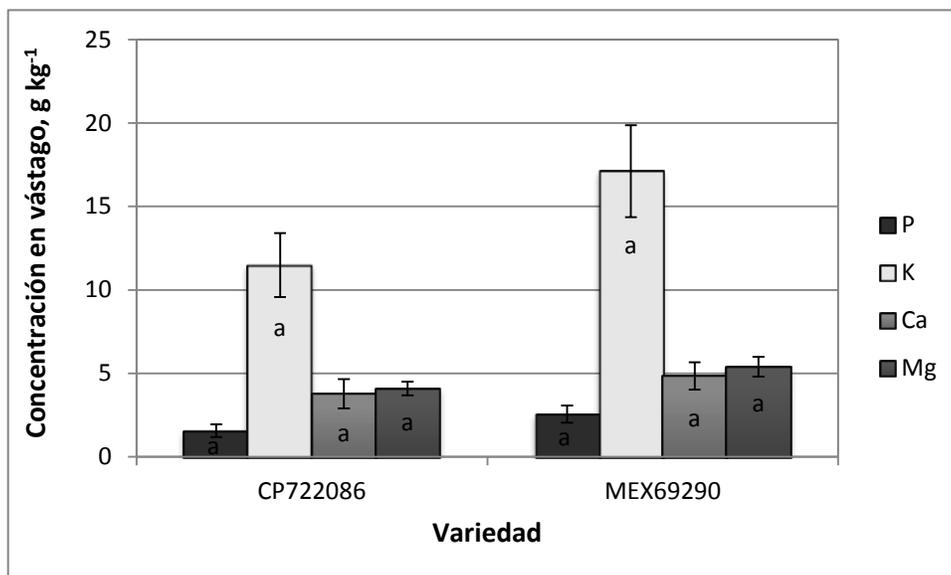


Figura 33. Concentración de P, K, Ca y Mg en vástago por efecto de la variedad de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Por efecto del factor variedad (**Figura 34**), sólo la concentración de Ca tuvo diferencias significativas entre variedades en raíz, mostrando su mayor concentración en la variedad CP722086.

Por efecto de la interacción de factores de estudio, las concentraciones de P, Ca y Mg fueron diferentes estadísticamente entre tratamientos. La media más alta de concentración de P se registró en el tratamiento TCZ/MEX 69290; la de Ca en TBZ/MEX 69290; mientras que, la de Mg en el tratamiento TCA/MEX 69290 (**Figura 35**).

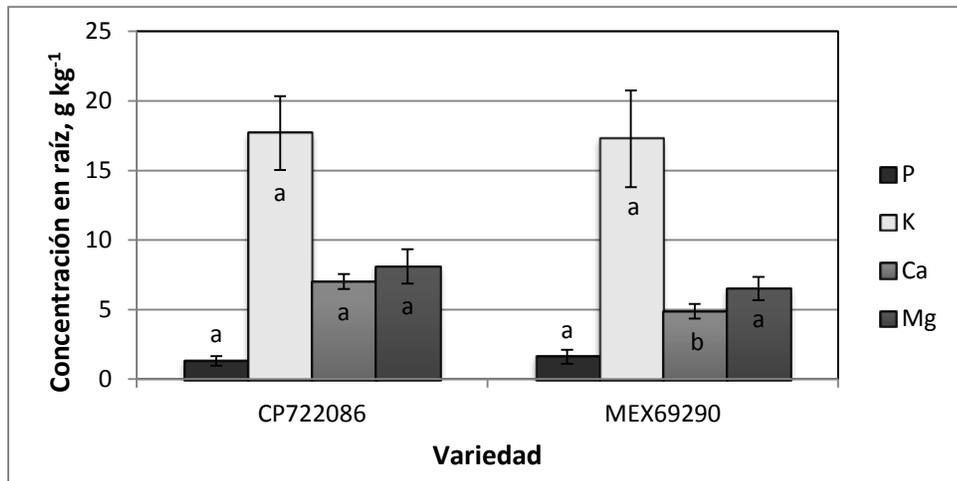


Figura 34. Concentración de P, K, Ca y Mg en raíz por efecto de la variedad de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

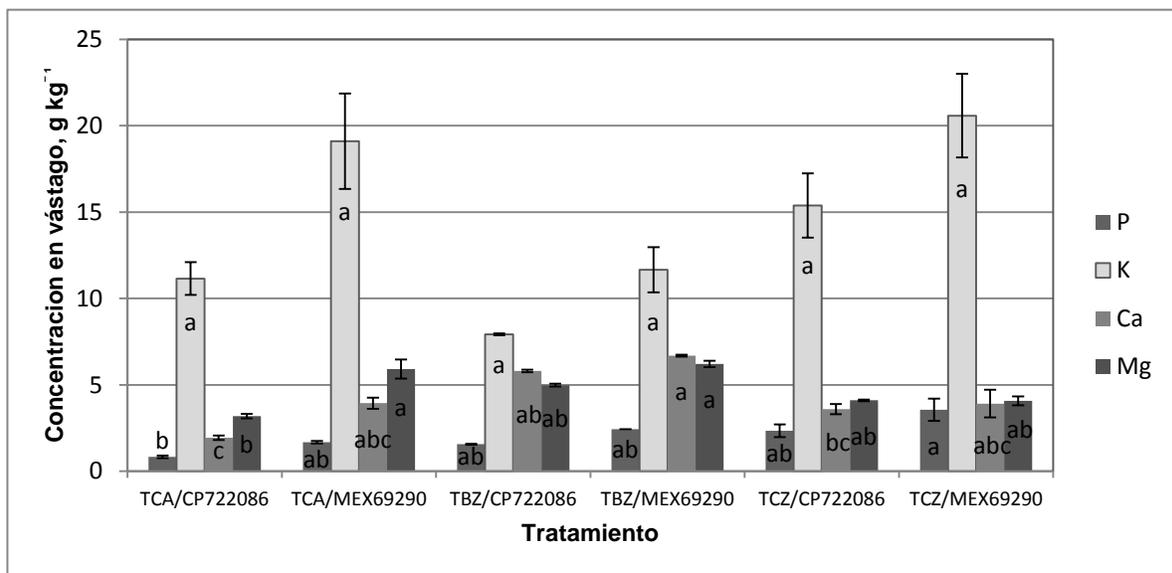


Figura 35. Concentración de P, K, Ca y Mg en vástago por efecto de la interacción sustrato/variedad después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $\alpha=0.05$).

En raíces, sólo la concentración de P en raíces fue influenciada significativamente por los tratamientos evaluados (interacción sustrato/variedad); registrándose la media más alta en el tratamiento TCZ/MEX69290 (**Figura 36**).

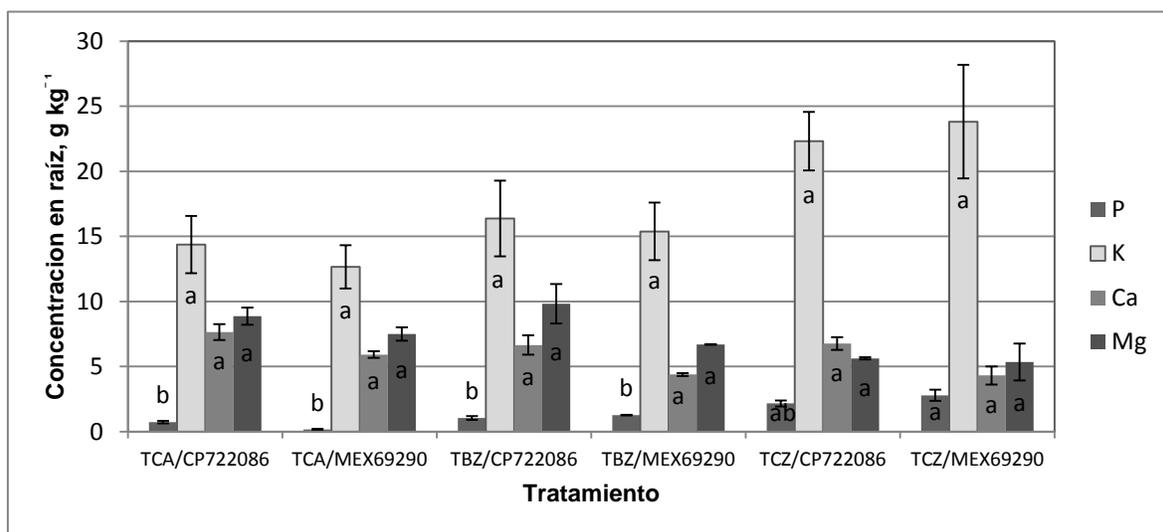


Figura 36. Concentración de P, K, Ca y Mg en raíces por efecto de la interacción sustrato/variedad después de 60 días de aplicados los tratamientos. Medias \pm DE con letras distintas en cada elemento indican que existen diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $\alpha=0.05$).

6.5.6.2.3. Micronutrientos

En el **Cuadro 13** se observa que la concentración de micronutrientos fue mayor en raíz que en parte aérea, siendo Fe y Na los elementos con las concentraciones más altas. En raíz sólo el Mn y el Fe mostraron diferencias en concentración por efecto del factor de estudio sustrato en las mezclas conteniendo cascarilla de arroz, el resto de los elementos no mostraron diferencias significativas en ninguno de los dos órganos.

Cuadro 13. Concentración de micronutrientos en vástago y en raíz por efecto del sustrato después de 60 días de aplicados los tratamientos.

Sustrato	Fe	Zn	Mn	B	Na
Concentración en vástago, g kg⁻¹					
TBZ	0.62 a ±0.16	0.040 a ±0.006	0.16 a ±0.04	0.103 a ±0.01	3.75 a ±1.86
TCA	0.46 a ±0.28	0.056 a ±0.02	0.26 a ±0.12	0.097 a ±0.04	1.39 b ±0.52
TCZ	0.64 a ±0.24	0.047 a ±0.007	0.14 a ±0.02	0.145 a ±0.01	2.26 ab ±0.50
Concentración en raíz, g kg⁻¹					
TBZ	7.59 ab ± 2.89	0.067 a ±0.017	0.48 b ± 0.11	0.132 a ± 0.07	5.06 a ± 0.89
TCA	8.45 a ± 1.06	0.081 a ± 0.011	0.90 a ± 0.12	0.091 a ± 0.02	5.00 a ± 0.75
TCZ	4.23 b ± 1.51	0.074 a ± 0.018	0.60 b ± 0.10	0.199 a ± 0.08	7.75 a ± 0.62

Medias ± DE con letras distintas en cada elemento por órgano indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Las concentraciones de micronutrientos en vástago y raíces por efecto de variedad se presentan en el **Cuadro 14**. Se observa que sólo la concentración de Zn en vástago presentó diferencias por estadísticas, registrándose la media más alta en la variedad MEX69290.

Cuadro 14. Concentración de micronutrientos en vástago y raíz por efecto de la variedad de caña de azúcar después de 60 días de aplicados los tratamientos.

Variedad	Fe	Zn	Mn	B	Na
Concentración en vástago, g kg⁻¹					
CP722086	0.51 a ±0.28	0.038 b ±0.004	0.14 a ±0.02	0.097 a ±0.03	1.90 a ±0.75
MEX69290	0.63 a ±0.17	0.058 a ±0.01	0.23 a ±0.11	0.133 a ±0.02	3.03 a ±1.83
Concentración en raíz, g kg⁻¹					
CP722086	7.71 a ±2.26	0.079 a ±0.01	0.66 a ±0.17	0.116 a ±0.05	4.77 a ±0.86
MEX69290	5.80 a ±2.77	0.069 a ±0.01	0.66 a ±0.26	0.166 a ±0.08	5.11 a ±0.52

Medias ± DE con letras distintas en cada gráfica indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

Los resultados de concentración de micronutrientos por efecto de la interacción sustrato/variedad (**Cuadro 15**) muestran diferencias estadísticas significativas para todos ellos en vástago, y en raíz sólo para los elementos Fe y Mn. En vástago, la concentración de Fe fue superior en el tratamiento TBZ/CP722086, las concentraciones de Zn y Mn fueron superiores en el tratamiento TCA/MEX69290,

y las de B y Na en el tratamiento TCZ/MEX69290. En raíces la media más alta en la concentración de Fe se registró en el tratamiento TBZ/CP722086, mientras que la de Mn en el tratamiento TCA /MEX69290

Cuadro 15. Concentración de micronutrientos en vástago y raíz por efecto de la interacción sustrato/variedad después de 60 días de aplicados los tratamientos.

Tratamiento	Fe	Zn	Mn	B	Na
Concentración en vástago, g kg⁻¹					
TBZ/CP722086	0.48 bc± 0.014	0.036 b ± 0.001	0.120 b ± 0.005	0.096 bc± 0.005	2.35 ab ± 0.38
TBZ/MEX69290	0.75 a ± 0.056	0.045 b ± 0.006	0.195 b ± 0.017	0.110abc±0.008	5.14 a ± 1.57
TCA/CP722086	0.22 d± 0.021	0.035 b ± 0.004	0.166 b ± 0.009	0.064 c ± 0.003	1.03 b ± 0.13
TCA/MEX69290	0.70 ab±0.129	0.078 a± 0.009	0.357 a± 0.064	0.130 ab±0.023	1.74 b ± 0.54
TCZ/CP722086	0.84 a± 0.031	0.042 b ± 0.006	0.144 b ± 0.007	0.131 ab±0.008	2.32 ab ± 0.61
TCZ/MEX69290	0.43 cd± 0.071	0.052 b ± 0.007	0.134 b ± 0.036	0.158 a ± 0.015	2.20 a ± 0.60
Concentración en raíz, g kg⁻¹					
TBZ/CP722086	9.80 a ± 2.36	0.079 a ± 0.014	0.54 ab ± 0.139	0.076 a ± 0.025	5.28 a ± 1.38
TBZ/MEX69290	5.39 ab ± 0.09	0.054 a ± 0.005	0.42 b ± 0.030	0.188 a ± 0.005	4.85 a ± 0.57
TCA/CP722086	7.85 a ± 1.17	0.084 a ± 0.017	0.86 ab ± 0.129	0.103 a ± 0.103	4.70 a ± 0.95
TCA/MEX69290	9.04 a ± 0.74	0.078 a ± 0.003	0.94 a ± 0.131	0.080 a ± 0.009	5.31 a ± 0.63
TCZ/CP722086	5.48 ab ± 0.071	0.074 a ± 0.007	0.58 ab ± 0.004	0.170 a ± 0.008	4.33 a ± 0.24
TCZ/MEX69290	2.98 b ± 0.077	0.075 a ± 0.031	0.62 ab ± 0.165	0.228 a ± 0.119	5.17 a ± 0.64

Medias ± DE con letras distintas en cada elemento por órgano indican que existen diferencias estadísticas entre niveles del factor de estudio (Tukey, $\alpha=0.05$).

VII. CONCLUSIONES

El proceso de aclimatación fue exitoso cuando las vitroplantas fueron establecidas en el sustrato constituido por tezontle y cascarilla de arroz.

El uso de cascarilla de arroz se presenta como una alternativa viable y económica para la aclimatación de vitroplantas de caña de azúcar.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abad, M. 1989. Los sustratos en horticultura ornamental. *Revista Agrícola Vergel* 3:146-152.
- Alcántar, G. G. y Sandoval V., M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Publicación especial No. 10. Chapingo México. 156 p.
- Álvarez-Herrera, J. G.; Rodríguez, S. L.; y Chacón, E. 2007. Efecto de diferentes tamaños de esqueje y sustratos en la propagación del romero (*Rosmarinus officinalis* L.). *Agronomía Colombiana* 25(2): 224-230.
- Ansorena, M, J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ediciones Mundiprensa. pp.172
- Barra A, A.G. y Mogollón M, N.J. 2007. Aclimatización de vitroplantas de *Etilingerahemisphaerica* Red Tulip. *Rev. Fav. Agron.* 1(24): 32-38.
- Basanta, R.; García Delgado, M. A.; Cervantes Martínez, J. E.; Mata Vázquez H. y Bustos Vázquez, G. 2007. Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: Una revisión. *Ciencia y Tecnología Alimentario* 5(4): 293-305.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas, Madrid, España. 341 p.
- Borroto J.; Blanco A.M.; Tambara J.; Capdesuñer Y.; Golle J. L.; Balde, A.; Rivas, M.; León, A.; Hormaza, J. y Peralta, H. 2003. Contenido de carbohidratos asociados al crecimiento y desarrollo de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* sp). *Agronomía Costarricense* 27 (1): 91-100.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *In: Methods of soil analysis. Part 2.* Agronomy 9. Black, C. A. (ed.). American Society of Agronomy. Madison, WI, U. S. A. pp. 1149-1178.
- Castellanos, J. Z. y Vargas, T. P. 2003. El uso de sustratos en la horticultura protegida. *In: J. J. Muñoz-Ramos y J. Z. Castellanos (Eds). Manual de producción hortícola en invernadero.* pp. 130-156. INACAPA. México.
- Castillo, A. 2004. Propagación de plantas por cultivo in vitro. Una biotecnología que nos acompaña hace mucho tiempo. INIA.
- Comparini A., S. D. 2006. Evaluación de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en el Ingenio La Unión, Santa Lucía, Cotzumalguapa. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos. Guatemala, Gt. 131 p.
- De Boodt, M.; Verdonck, O.; Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae* 37: 2054-2062.
- De Rezende, A. L.; Da Silva, A. B.; Pasqual, M. 2000. Aclimação de plantas de violeta (*Saintpaulia ionantha* Wendl) obtidas *in vitro*: efeitos do substrato. *Ciênc. Agrotec. Lavras* 24(1): 9-12.
- Díaz, L. P.; Medina, L. F.; Latife, J. 2004. Aclimatación de plantas micropropagadas de caña de azúcar utilizando el humus de lombriz. *Revista de Investigaciones Agropecuarias.* 33(2): 115-128.
- Domínguez, T. G.; Donayre, G. M. L. 2006. Aclimatación de *Uncaria tomentosa* (Willd.) DC. producida *in vitro*. *Ecología Aplicada* 5(2): 67-74.
- Figueroa S, B. 2009. Notas del curso de Física de suelos (EDA-601). Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.
- Galindo, I.; Acosta, E.; Peña, P.; Pueyo, M. 2008. Alternativa de sustratos en la fase de adaptación de las vitroplantas de caña de azúcar. Centro Universitario "V.I. Lenin". Las Tunas*. Laboratorio Provincial de Sanidad Vegetal. La Habana, Cuba.

- Gutiérrez-Miceli, F. A.; Oliva-Llaen, M. A.; Rincón-Rosales, R. y Dendooven, L. 2006. Selección de genotipos de caña de azúcar usando características de cultivo de callos. *Agrociencia* 40(5): 605-611.
- Lee E, H.E.; Cruz C, J.G.; García R, B. 2003. Proliferación de brotes múltiples y aclimatación de anturio (*Anturium andreaeanum* L.) Midori y Kalapana cultivados *in vitro*. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 4 (26): 301-307.
- Lorenzo F., J. C. 2002. Biotecnología de la caña de azúcar: algunos aportes. Editorial Universitaria. La Habana, Cuba.
- Luque E., A.; Pérez M., G. 1976. Sustratos y sus propiedades. Fourth International Congress on Soilless Culture. España. pp. 310- 312.
- Maccio, J.M. 2007. Aprovechamiento de un fertilizante alternativo para la caña de azúcar en predios de superficie reducida. INTA. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Instituto nacional de Tecnología Agropecuaria.
- OIRSA. 2005. Manual producción de sustratos para viveros. Editorial OIRSA (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria).
- Park, B-D.; Singh, A. P.; Wi, S-G.; Lee, K. H. and Kim, Y. S. 2003. Characterization of rice husk using microscopic and micro-analytical techniques. 7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites. Madison, WI. pp. 323-331.
- Pastor S., N. 1998. Tecnología de sustratos. Aplicación a la producción viverística, ornamental, hortícola y forestal. Ediciones Universitat de Lleida, España. 193 p.
- Pastor S., J. N. 1999. Utilización de sustratos en viveros. *Terra Latinoamericana* 17(3): 231-235.
- Pire, R.; Pereira, A. 2003. Propiedades Físicas de los componentes de sustratos de uso común en la Horticultura del estado de Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*. 15 (1): 55-63.
- Pospíšilová, J.; Tichá, I.; Kadleček, P.; Haisel, D. and Plzáková, Š. 1999. Acclimatization of micropropagated plants to *ex vitro* conditions. *Biologia Plantarum* 42: 481-497.
- Resh, H. M. 2001. Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Versión española. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 560 p.
- Rodríguez, R.; Escalona, M.; Rodríguez, Y.; Cid, M.; y González Olmedo, J. L. 2000. Aclimatización de plántulas de caña de azúcar (*Saccharum* sp. híbrido) provenientes de sistemas de inmersión temporal. *Cultivos Tropicales* 21(3): 51-56.
- Sánchez, A., Suárez, E., Labarca, C., Viloria, Z., Albany, N., Vílchez, J. y Bracho, B. 2007. Aclimatización de vitroplantas sin raíces de zábila (*Aloe vera* (L) Burm. f.) de diferentes tamaños. *Rev. Fav. Agron.* 24 (1) 67-72.
- Santana, I.; Nordarse, O. y Fernández, Z. 1992. Estudio comparativo de la propagación *in vitro* y por estacas en cuatro variedades de caña de azúcar. *Revista Científica Caña de Azúcar* 10 (2): 51-59.
- SIAZUCAR. Diagnóstico, modelaje y recomendaciones de la fertilidad de suelos del campo cañero. Etapa II. 2009. Sagarpa. 66 p.
- Southgate, D. A. 1976. Determination of food carbohydrates. Applied Science Publishers. LTD. London. 105 p.
- Svartz, H.A., González, M.G., Arrigo, N.M., Palam, R.M. 2004. Bagazo de caña desmedulada: su empleo como sustrato en un cultivo de geranio. *Revista Facultad de Agronomía*. 24 (2):107-112.
- Urrestarazu, G., M. 2000. Manual de cultivo sin suelo. Ediciones. Mundiprensa, Almería. 648 p.

- Valenzuela, O.; Gallardo, C. 2003. Sustratos Hortícolas. Un insumo clave en los sistemas de producción de plantines. Revista IDIA XXI 4: 25-29.
- Velázquez, M. J. 2008. Extracción nutrimental en lisianthus (*Eustoma grandiflorum* Raf. cv. Mariachi). Tesis de Licenciatura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. 102 p.
- Vilchez, J.; Ramírez, E.; Villasmil, L.; Albany, N.; León de Sierralta, S. y Molina, M. 2007. Aclimatación de vitroplantas de zabila (*Aloe vera* (L.) Burm. f): efectos del sustrato. Rev. Fav. Agron. (Luz) 24(1): 57-61.
- Zérega M, L. 1993. Manejo y uso agronómico de la cachaza en suelos cañamieleros. Caña de Azúcar 2 (11).
- Zhu Y, J.; Komor, E.; Moore, P.H. 1997. Sucrose accumulation in the sugarcane stem is regulated by the difference between the activities of soluble acid invertase and sucrose phosphate synthase. Plant Physiology 115 609-616.

CAPÍTULO III. CADMIO EN LA CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*) VARIEDAD CP722086 ESTABLECIDA EN SUSTRATOS FORMULADOS CON RESIDUOS AGRÍCOLAS

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados actualmente representa un problema para el medio ambiente y, en consecuencia, para la salud pública, siendo la industria una de las principales fuentes antropogénicas de contaminación por dichos metales pesados. La búsqueda de soluciones ha llevado a la exploración de diversos campos para encontrar la solución a este problema. Las plantas se han presentado como una opción viable para la recuperación de suelos contaminados. . La caña de azúcar puede ser una planta usada en la fitorremediación de suelos donde se encuentren altos contenidos de Cd. No obstante, ha sido reportado que dicho elemento afecta, además del crecimiento, la concentración de elementos nutrimentos en plantas superiores. En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto que el Cd tiene en el estatus nutrimental de plantas de caña de azúcar variedad CP722086.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cadmio en la naturaleza

El Cd es un metal blanco, dúctil, maleable, de densidad de 8.65 g cm^{-3} y cuyo punto de fusión es de $321 \text{ }^\circ\text{C}$. Sus minerales están estrechamente ligados a los del zinc y el plomo. Por ello, el Cd constituye un subproducto de las industrias del zinc y del plomo. Los principales compuestos utilizados en la industria son el óxido (CdO), el sulfuro (SCd), el cloruro (CdCl), el bromuro (CdBr) y el sulfato (CdSO₄) (Lauwerys, 1994).

La diseminación de fertilizantes fosfatados por los campos agrícolas -que contienen Cd como contaminante natural- y depurados de fangos residuales contaminados por el metal procedente de vertederos industriales, aumenta el nivel de Cd en el suelo y, subsiguientemente, en las plantas que lo incorporan (Baird, 2001).

Calvo de Anta (1997; citado por Cruz-Guzmán, 2007) menciona que los cuatro caminos distintos que pueden seguir los metales pesados incorporados al suelo son los siguientes:

1. Quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la disolución, o bien, fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
2. Ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
3. Pasar a la atmósfera por volatilización
4. Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

Las respuestas a este metal no son específicas, ya que no difieren significativamente de las reseñadas para otros metales pesados (Perniaet *al.*, 2008).

En pH ácidos, los oxi-hidróxidos de hierro y la materia orgánica controlan la solubilidad del Cd, y a pH alcalino, el Cd precipita, por lo que es inmóvil. La concentración de Cd en la solución del suelo es de 0.2 a $6 \mu\text{g L}^{-1}$; en suelos contaminados se ha llegado a reportar concentraciones hasta de $400 \mu\text{g L}^{-1}$ (Bautista, 1999).

2.2. El cadmio en las plantas

El Cd causa efectos tóxicos para los organismos vivos, y los humanos están en riesgo de que entre a sus cuerpos a través de los alimentos. El Cd es tomado por

las plantas cultivadas del suelo y acumulado en las partes comestibles por humanos y animales domésticos. Generalmente altas concentraciones de este elemento en los suelos resultan en altas concentraciones de Cd en las plantas, y la fitorremediación es una solución para este problema (Muraki *et al.*, 2008 citado por Ogawa *et al.*, 2009).

La absorción de Cd por raíz depende tanto de su biodisponibilidad, como de su concentración en el suelo, de la presencia de materia orgánica, el pH, el potencial redox, la temperatura y la concentración de otros elementos (Di Toopi y Gabbrielli, 1999). Se cree que el Cd penetra la raíz a través del tejido cortical. Tan pronto como entra a la raíz, puede llegar al xilema a través del apoplasto y/o a la ruta simplasto (Salt *et al.* 1995 citado por Di Toopi y Gabbrielli, 1999).

Cantidades pequeñas de Cd²⁺ en los cloroplastos provocan una fuerte inhibición de la fotosíntesis (Prasad, 2004), la apertura estomatal y la transpiración (Di Toopi y Gabbrielli, 1999). Adicionalmente, el cadmio ha mostrado interferir en la toma, transporte y función de varios elementos (Ca, Mg, P y K) y el agua por las plantas (Das *et al.*, 1997 citado por Benavides *et al.*, 2005).

Se ha reportado que el Cd genera estrés oxidativo, el cual se caracteriza por la producción de grandes cantidades de especies reactivas de oxígeno, consistentes en singletes de O₂, anión superóxido, peróxido de hidrógeno y radical hidroxilo (Pernia *et al.*, 2008).

En el caso de la contaminación por Cd, las plantas responden a este metal activando la síntesis de glutatión, fitoquelatinas y nicotiniamina como respuestas específicas a este tipo de contaminantes. De igual modo, hay una gama de respuestas moleculares generales, tales como el aumento de la peroxidación lipídica y la concentración del ácido jásmonico, así como alteraciones en la actividad de las enzimas antioxidantes (Pernia *et al.*, 2008). De acuerdo con Di Toopi y Gabbrielli (1999), las células de las plantas pueden recurrir a un sinnúmero de sistemas de defensa en respuesta a estrés por Cd, tales como: inmovilización, exclusión, síntesis de fitoquelatinas, compartimentalización, probablemente a síntesis de metalotioneínas, síntesis de proteínas de estrés y producción de estrés por etileno.

Cuadro 1. Principales efectos del Cd en las funciones fisiológicas de las plantas descritos por diversos autores (Pernia *et al.*, 2008).

Efectos	Referencias
Reducción en el crecimiento y de la elongación de las raíces	Wang y Zhou, 2005; Chaoui y Ferjani, 2005; Pomponiet <i>et al.</i> , 2006; Aina <i>et al.</i> , 2007; Gianza <i>et al.</i> , 2007; Wang <i>et al.</i> , 2007
Inhibición de la apertura estomática	Barceló <i>et al.</i> , 1986; Barceló y Poschenrider, 1990
Inhibición de la síntesis de clorofila	Padmaja <i>et al.</i> , 1990; Wu <i>et al.</i> , 2004; Drazic y Mihailovic, 2005; Mishra <i>et al.</i> , 2006
Inhibición de la fotosíntesis	Van Assche y Clijsters, 1990; Pietrini <i>et al.</i> , 2003; Drazkiewicz <i>et al.</i> , 2003; Dalla Vecchia <i>et al.</i> , 2005
Clorosis	Aidid y Okamoto, 1992; Aravind y Prasad, 2003, 2005; Mishra <i>et al.</i> , 2006
Disminución en el contenido de carotenoides	Larsson <i>et al.</i> , 1998; Rai <i>et al.</i> , 2005; Mishra <i>et al.</i> , 2006; Singh <i>et al.</i> , 2006;
Disminución en la tasa de transpiración	Haag-Kerwer <i>et al.</i> , 1999; Sandalio <i>et al.</i> , 2001
Inhibición en la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico	Xiong y Peng, 2001
Aumento en los niveles en la peroxidación del tubo polínico	Chaoui <i>et al.</i> , 1997; Zhang <i>et al.</i> , 2005; Mishra <i>et al.</i> , 2006; Singh <i>et al.</i> , 2006
Estrés oxidativo y enzimas antioxidantes	Romero-Puertas <i>et al.</i> , 2004, 2007; Gallego <i>et al.</i> , 2005; Maksymiec y Krupa, 2006; Brahim <i>et al.</i> , 2007; Han <i>et al.</i> , 2008
Inhibición de la fosforilación oxidativa mitocondrial	Kessler y Brand, 1995
Interferencia con la toma, transporte y uso de varios macros y micronutrientes, especialmente Fe, Mn y Zn	Di Toppi y Gabbrielli, 1999; Zhou y Qiu, 2005
Aceleración de la senescencia celular	Di Toppi y Gabbrielli, 1999
Reacciones semejantes a la hipersensibilidad	Piqueras <i>et al.</i> , 1999
Reducción del intercambio normal de H ⁺ /K ⁺ y la actividad de la ATPasa de membrana plasmática	Obata <i>et al.</i> , 1996
Disturbio en el control redox y el metabolismo	Schutzendubel y Polle, 2002; Deviet <i>et al.</i> , 2007; Ernst <i>et al.</i> , 2008
Polimorfismo en el ADN	Mukherjee <i>et al.</i> , 2004 ; Liu <i>et al.</i> , 2005

En caña de azúcar las concentraciones de Cd que causan cambios significativos en el crecimiento y en las respuestas de los antioxidantes, deben ser más altas que la concentración que se encuentra normalmente en los suelos agrícolas según lo reportan Forzanier *et al.*, 2002; citado por Acevedo *et al.*, 2011).

De acuerdo con Sereno *et al.* (2006), la caña de azúcar tolera hasta 500 μM de Cd sin mostrar síntomas de toxicidad, acumulando 451 mg Cd kg^{-1} de peso seco en los tallos después de 33 días, lo cual indica su potencial como un fitorremediador de Cd. López (2002) demostró que las semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris*) son capaces de germinar en sustratos contaminados por Cd en una concentración de 10 ppm y con Pb 2000 ppm.

III. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del Cd en la concentración nutrimental en vástago de caña de azúcar variedad CP722086 en cuatro sustratos, tres de ellos formulados con residuos agrícolas.

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el efecto de la solución nutritiva en la concentración nutrimental de vástago de caña de azúcar variedad CP722086, a partir de la adición de Cd.
2. Valorar el efecto de cuatro sustratos en la concentración nutrimental en vástago de caña de azúcar variedad CP722086.
3. Determinar el efecto de la interacción Cd X sustrato en la concentración nutrimental de vástago de caña de azúcar variedad CP722086.

IV. HIPÓTESIS

El sustrato utilizado tiene un efecto interactivo con el Cd adicionado en la solución nutritiva, y dicha interacción tiene influencia sobre la concentración nutrimental en vástago de caña de azúcar variedad CP722086.

4.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

1. La adición de Cd a la solución nutritiva no afecta la concentración nutrimental vástago de caña de azúcar variedad CP722086, dado que esta especie es clasificada como tolerante a este metal.
2. Los sustratos evaluados tienen efecto en la concentración nutrimental en vástago de caña de azúcar variedad CP722086.
3. La interacción entre el factor Cd y el factor sustrato afecta significativamente las concentraciones nutrimentales en vástago de caña de azúcar variedad CP722086.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del experimento y condiciones experimentales

La investigación se realizó en los invernaderos del área de Nutrición Vegetal ubicados en el Campus Montecillo, en Montecillo, México. Se usó un invernadero tipo cenital de estructura metálica.

5.2. Material vegetal

Se usaron plantas de caña de azúcar de la variedad CP722086, la cual se caracteriza por tener tallos superiores a los 3 m de longitud, con un diámetro entre 2.5 y 3 cm (Aldana, 2006); el valor de grados Brix en esta variedad es de 17 (Comparini, 2006).

Las plantas fueron traídas de campo con su cepellón, con una altura promedio de entre 35 y 40 cm, y fueron trasplantadas en bolsas de vivero de color negro con capacidad de 4 L. Las plantas fueron podadas a una altura de 30 cm antes de la aplicación de los tratamientos.

5.3. Tratamientos

En este experimento, los tratamientos son el resultado del ensayo de dos factores: Cd en la solución nutritiva y sustrato (**Cuadro 2**) en un experimento factorial. El primer factor ensayado a los niveles 0 y 1 mM de Cd; en el segundo factor se evaluaron los siguientes cuatro niveles: tezontle, tezontle + bagazo de caña, tezontle +cascarilla de arroz, tezontle + cachaza.

Cuadro 2. Tratamientos evaluados

Tratamiento	Nivel del factor SUSTRATO	Nivel del factor Cd en la solución nutritiva, mM
1	Tezontle	T/0
2	Tezontle	T/1
3	Tezontle + Bagazo (TBZ)	TBZ/0
4	Tezontle + Bagazo (TBZ)	TBZ/1
5	Tezontle + Cascarilla de arroz (TCA)	TCA/0
6	Tezontle + Cascarilla de arroz (TCA)	TCA/1
7	Tezontle + Cachaza (TCZ)	TCZ/0
8	Tezontle + Cachaza (TCZ)	TCZ/1

Los sustratos consistieron en la mezcla de tres subproductos agrícolas (bagazo de caña, cachaza y cascarilla de arroz) y tezontle, en relación 40:60 (v/v, tezontle/residuo). Un cuarto sustrato consistió sólo de tezontle. El tamaño de partícula del tezontle fue de 5 mm de diámetro. Tanto las mezclas como el tezontle se esterilizaron en una autoclave por 20 min a una temperatura de 120 °C y 150 kPa. La caracterización físico-química de los sustratos puede ser consultada en el Capítulo II.

La aplicación de Cd inició 30 días después del establecimiento de las plantas de caña en los sustratos. Se realizó cada 5 días hasta completar 10 aplicaciones de 250 mL por planta. El Cd fue adicionado a la solución nutritiva de Steiner al 10% (**Cuadro 3**) como $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ en una concentración de 1 mM, en los tratamientos correspondientes. Las sales empleadas fueron $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 , KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y KNO_3 , grado reactivo de la marca J. T. Baker. Los tratamientos sin Cd fueron regados también con la solución Steiner al 10 % con el mismo volumen. El riego se realizó con agua corriente a punto de saturación, entre aplicaciones. El pH de las soluciones nutritivas se ajustó a 6.0. Dichas soluciones fueron complementadas con micronutrientes, a partir de sales grado reactivo de la marca J. T. Baker (**Cuadro 4**), adicionando 1 mL de la solución de micronutrientes por cada litro de solución nutritiva. El Fe-EDTA fue elaborado de acuerdo a Steiner y van Winden (1970), a una concentración de 5 mg L^{-1} .

Cuadro 3. Concentración de la solución nutritiva de Steiner al 10% (Steiner, 1984).

	NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
$\text{mol}_e \text{ m}^{-3}$	1.2	0.1	0.7	0.7	0.9	0.5

Cuadro 4. Composición de la mezcla de micronutrientes empleada para complementar la solución nutritiva.

Fuente	g L^{-1}
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4.922
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.432
H_3BO_3	4.947
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.101
H_2MoO_4	0.081
Fe-EDTA	1 mL L^{-1}

5.4. Diseño experimental

Como fue indicado previamente, se ensayó un experimento factorial, en un diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue una bolsa con su cepellón.

5.5. Instalación del experimento

Las plantas traídas de campo fueron sometidas a un proceso de desinfección, al sumergirse en una solución de fungicida de contacto (Captan) en una concentración de 2 g L⁻¹. Posteriormente fueron trasplantadas con su cepellón en bolsas de plástico de vivero de color negro con capacidad de 4 L, mismas que fueron previamente llenadas con los cuatro sustratos en evaluación. Los sustratos una vez en las bolsas, se saturaron con agua corriente. Las bolsas fueron engrapadas por los costados cada una contó con cuatro perforaciones. Treinta días después del trasplante las cañas fueron podadas a una altura de 30 cm para dar inicio a la aplicación de los tratamientos.

5.6. Variables respuesta

La concentración de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Cd fue determinada en vástagos. A excepción del N, el resto de los elementos fueron analizados empleando un equipo de espectrometría de emisión atómica, de inducción con plasma acoplado (Equipo ICP-AES VARIANTMLiberty II); en extractos provenientes de una digestión húmeda del material seco con una mezcla de ácidos perclórico y nítrico (Alcántar y Sandoval, 1999). El contenido de nitrógeno total se determinó empleando el método Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965) utilizando ácido sulfúrico-salicílico para su digestión.

5.7. Análisis estadísticos

Los datos fueron analizados mediante el procedimiento ANOVA del programa SAS (2003) como un diseño factorial; y se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 95%.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Concentración nutrimental

6.1.1. Nitrógeno

La adición de Cd a la solución nutritiva no afectó la concentración de N en vástago; por el contrario, el factor sustrato ocasionó diferencias estadísticas sobre esta variable, mientras que la interacción de ambos factores de estudio influyó de manera altamente significativa en esta variable. (**Cuadro 5**).

Cuadro 5. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de N en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Nitrógeno	ns	*	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

Los valores de concentración de N en vástago no fueron afectados por efecto de la adición de Cd en la solución nutritiva, aunque, el valor obtenido cuando se adicionó Cd a la solución nutritiva (1.21 ± 0.27) es considerado muy deficiente, en tanto que, el valor obtenido en ausencia de Cd es clasificado como deficiente para caña de azúcar (**Cuadro 6**) (McCray y Mylavarapu, 2010).

Cuadro 6. Efecto simple del factor Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de N en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Cd en la solución nutritiva, mM	Concentración de N en vástago, %
0	1.74 a ± 0.60
1	1.21 a ± 0.27

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$).

Las concentraciones de N por efecto del sustrato utilizado, se presentan en la **Figura 1**, en donde se puede apreciar que sólo la obtenida en el sustrato conteniendo tezontle y cascarilla de arroz es clasificada como suficiente con un valor de 2.17%; el resto de ellas es considerada como muy deficientes para esta especie de acuerdo a McCray y Mylavarapu (2010).

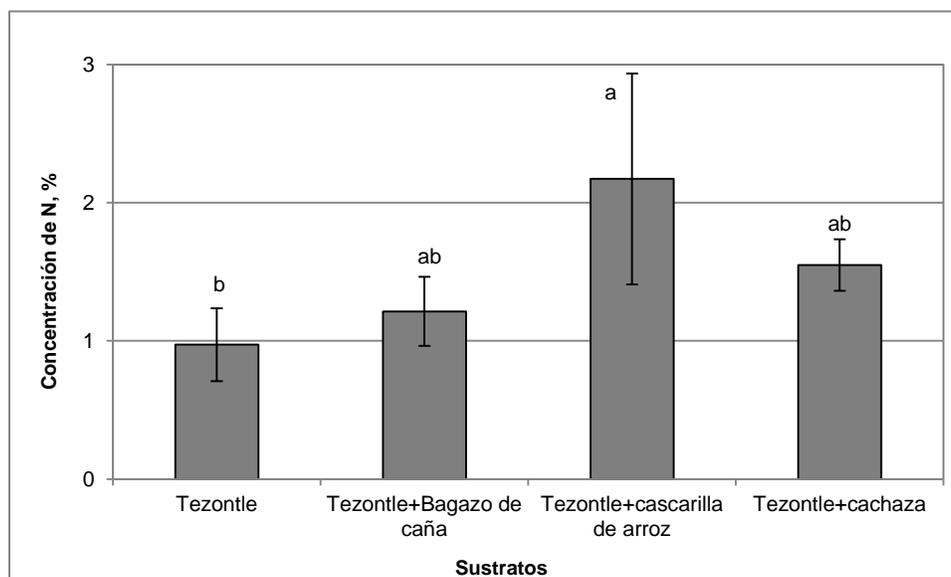


Figura 1. Efecto del sustrato en la concentración de N en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

En la **Figura 2** se muestran las concentraciones de N en vástago por efecto de la interacción de los factores de estudio. Es destacable la concentración obtenida en la combinación del sustrato TCA y la ausencia de Cd en la solución nutritiva, valor clasificado como muy alto en caña de azúcar (McCray y Mylavarapu, 2010).

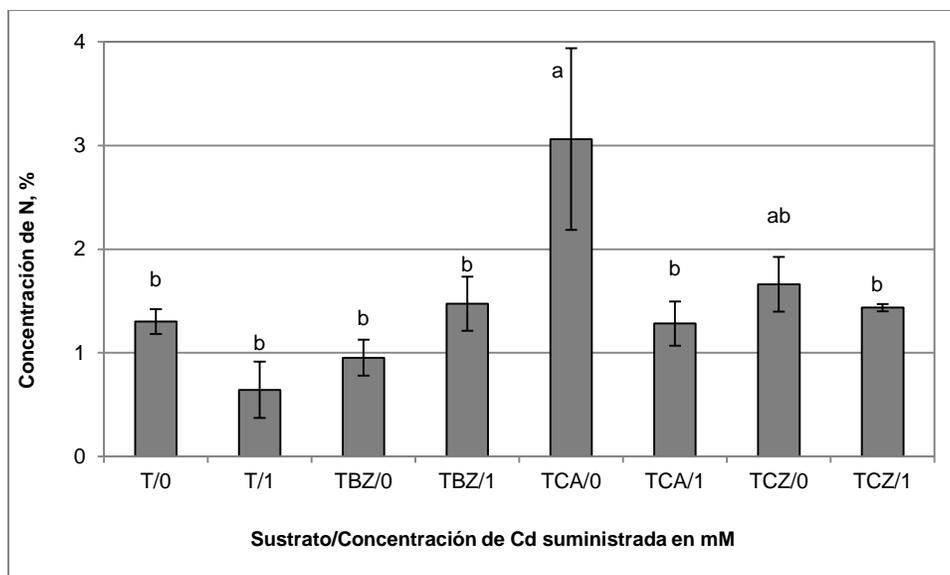


Figura 2. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd en la concentración de N en vástago de caña de azúcar variedad CP722086. T=Tezontle; TBZ=Tezontle + bagazo de caña; TCA=Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ= Tezontle + cachaza; 0= sin adición de Cd; 1= con adición de Cd 1Mn. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

6.1.2. Fósforo

Al igual que para el caso del N, las concentraciones de P obtenidas en vástago no fueron significativas por efecto simple del factor concentración de cadmio en la solución nutritiva (**Cuadro 7**), pero si por efecto del sustrato y de su interacción con Cd.

Cuadro 7. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Fósforo	ns	**	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

En el **Cuadro 8** se presentan los resultados de concentración de P obtenidos en vástago por efecto de la concentración de Cd suministrado a la solución nutritiva. Algunos estudios han demostrado que el P puede disminuir la toxicidad causada por la combinación de Cd y Zn, al reducir la movilidad y solubilidad de estos metales en el suelo (Vangronsveld y Cunningham, 1998; Hettiarachchi y Pierzynski, 1999). En soya (*Glycine max* L.) se observó una alteración en las concentraciones de Cd en tejido foliar por efecto del suministro de 0.4 M de fosfato, lo cual revela un efecto antagónico entre el P y Cd (Sajwan *et al.*, 2002). Estos resultados coinciden con los aquí obtenidos, al observar que la adición de Cd no afectó la concentración de P en vástago.

Cuadro 8. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Concentración de Cd, mM	Concentración de P en vástago, g kg ⁻¹ de materia seca
0	3.00 a ± 0.64
1	2.74 a ± 0.38

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$).

Las concentraciones de P en vástago por efecto del sustrato no muestran una relación con los contenidos solubles de este elemento en los subproductos agrícolas (**Cuadro 5 del Capítulo II**) que fueron utilizados como sustratos en combinación con el tezontle. Las concentraciones de P en caña en función del sustrato, oscilaron entre 2.32 y 3.83 g kg⁻¹ de materia seca; con la media más alta cuando se utilizó cachaza en el medio de crecimiento (**Figura 3**).

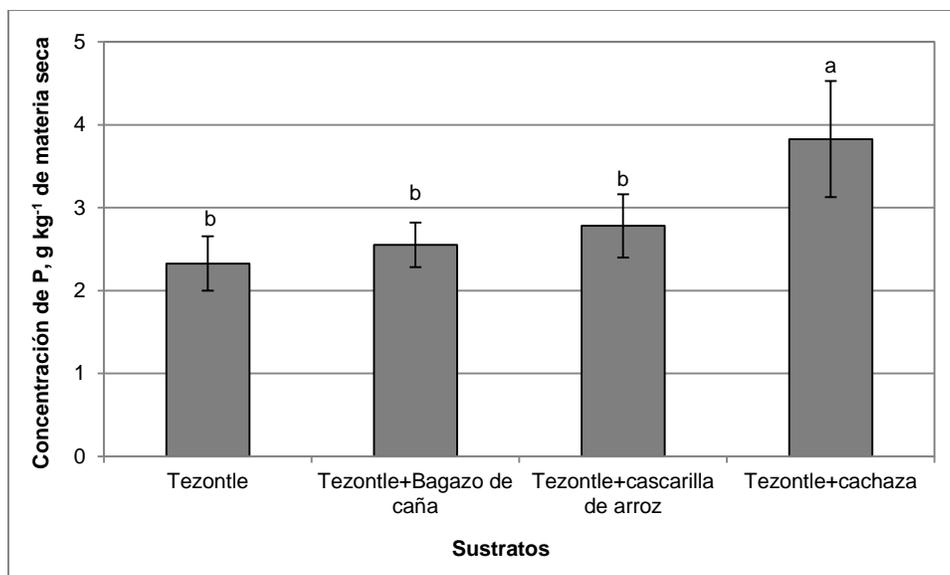


Figura 3. Efecto del sustrato utilizado sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

La **Figura 4** muestra las concentraciones de P en vástago de caña por efecto de la interacción de los factores de estudio, observándose los mayores valores cuando el sustrato contuvo cachaza, tanto con suministro de Cd como en ausencia de este metal. Es interesante destacar que sólo en las plantas establecidas en tezontle (T), la adición de Cd a la solución de riego, incrementó la concentración de P. En hojas de caña, la concentración de P considerada óptima oscila entre 2.2 y 3.0 g kg⁻¹ de materia seca (McCray y Mylavarapu, 2010). En este experimento, sólo las plantas del tratamiento sin Cd establecidas en tezontle son consideradas deficientes en P. Por otro lado, las plantas del tratamiento constituido por tezontle + cascarilla como sustrato y sin suministro de Cd, así como los dos tratamientos en los que se utilizó cachaza en el sustrato, tienen concentraciones de P clasificadas como altas según los intervalos establecidos por McCray y Mylavarapu (2010).

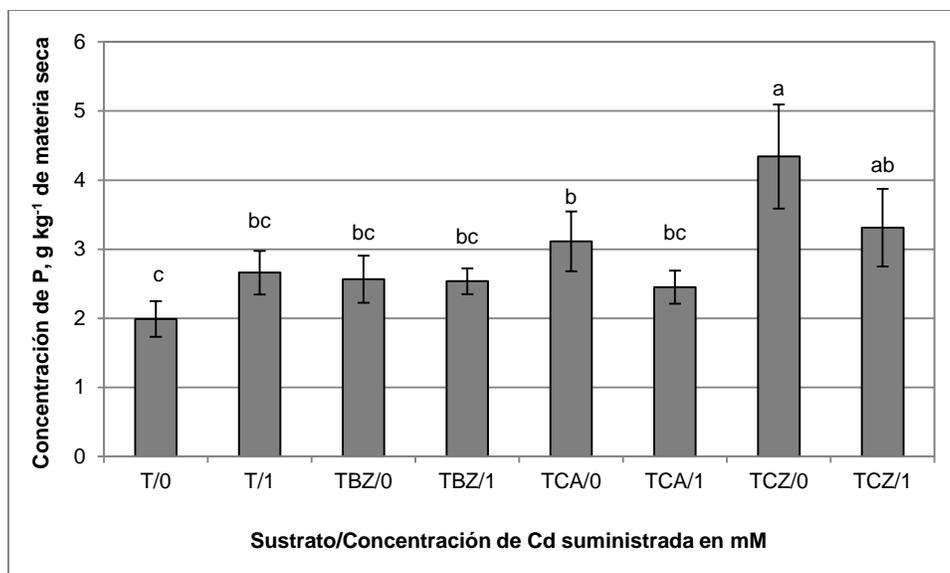


Figura 4. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de P en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. T=Tezontle; TBZ=Tezontle + bagazo de caña; TCA=Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ= Tezontle + cachaza; 0= sin adición de Cd y 1= con adición de Cd 1mM. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

6.1.3. Potasio

El nivel de significancia de los factores de estudio y su interacción sobre la concentración de K en vástago se presenta en el **Cuadro 9**.

Cuadro 9. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Potasio	*	*	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

La adición de Cd a la solución nutritiva empleada en el riego ocasionó una reducción significativa del contenido de K en parte aérea en caña de azúcar (**Figura 5**). Ciećko *et al.* (2004) reportan efectos diferenciales de la adición de Cd sobre la concentración de K, entre especies y entre órganos de las plantas. Así, la contaminación de un suelo con Cd disminuyó el contenido de K en granos de avena; y la parte aérea y raíces de lupino amarillo y rábano. En paja y raíces de avena, así como en raíces de maíz, la adición de Cd redujo la concentración de K. En arroz, Liu *et al.* (2011) reportaron que la disminución en la concentración de K se encuentra asociada con toxicidad por Cd en plántulas del cultivar Taichung Native 1 sensible a Cd. Por el contrario, en nabo japonés (*Brassica rapa* L. var. Pervirdis), la concentración de K en vástago de plantas con toxicidad por Cd, se incrementó (Kashem y Kawai, 2007).

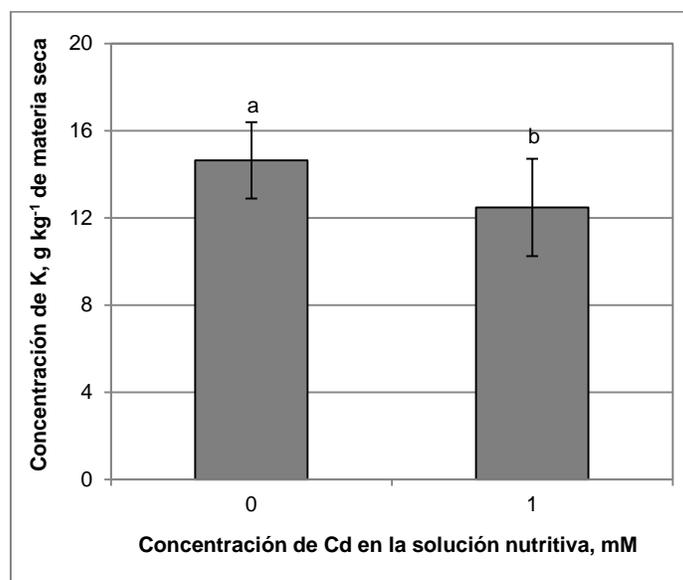


Figura 5. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

En la **Figura 6** se muestran las concentraciones de K en vástagos de caña de azúcar en función de los sustratos evaluados; al igual que en el caso del P, no existe relación entre el contenido de K soluble en el sustrato (TBZ= 0.055; TCA=0.255; TCZ=0.176 g kg⁻¹) y la concentración de este elemento en vástago.

Se observa que entre los tres sustratos que contienen residuos agrícolas no existen diferencias estadísticas significativas. La media más baja se registró en plantas crecidas en tezontle.

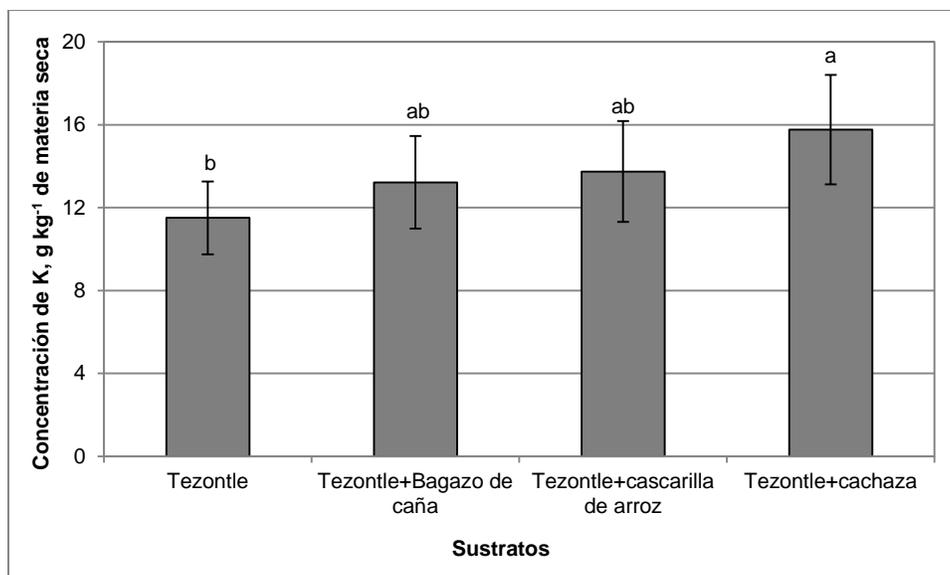


Figura 6. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes. Barras indican \pm DE.

La concentración de K en vástago de caña de azúcar considerada como suficiente oscila entre 10 y 13 g kg⁻¹ (McCray y Mylavarapu, 2010). Dentro de este intervalo se encuentran los valores obtenidos en todos los tratamientos evaluados en esta investigación (**Figura 7**). Es pertinente destacar las concentraciones obtenidas en plantas correspondientes a los tratamientos sin Cd y con sustratos conteniendo residuos agrícolas, dado que éstas son clasificadas como altas, con valores superiores a 13 g kg⁻¹. Las reducciones en la concentración de K ocasionadas por el suministro de Cd en la solución nutritiva fueron de 1.08, 4.36, 18.73 y 27.76% en los sustratos tezontle, tezontle + bagazo de caña, tezontle cascarilla de arroz y tezontle + cachaza, respectivamente.

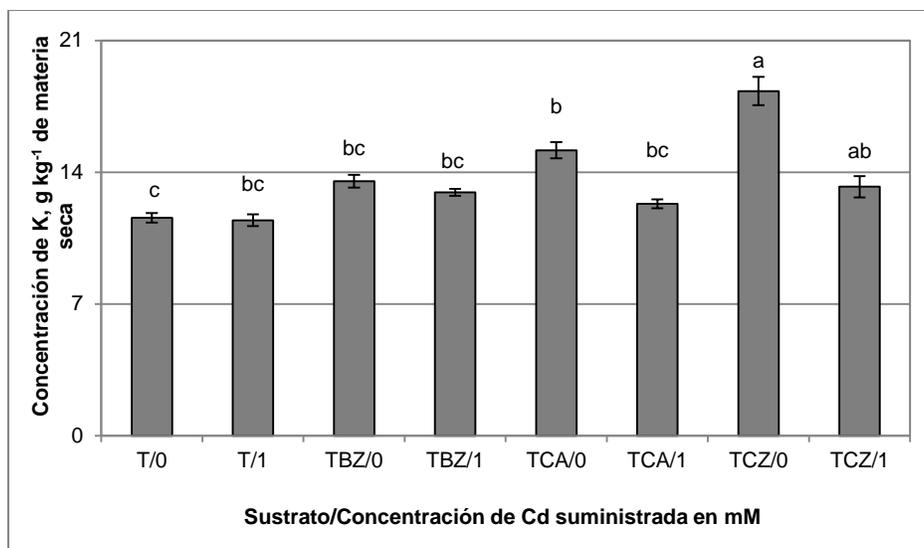


Figura 7. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de K en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. T=Tezontle; TBZ= Tezontle + bagazo de caña; TCA=Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ= Tezontle + cachaza; 0= sin adición de Cd y 1= con adición de Cd 1mM.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes. Barras indican \pm DE.

6.1.4. Calcio

El sustrato utilizado no tuvo efectos significativos sobre la concentración de Ca en vástago; por el contrario, el factor cadmio tuvo efectos altamente significativos sobre ésta y la interacción de los factores de estudio afectó significativamente la concentración de Ca (**Cuadro 10**).

Cuadro 10. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Calcio	**	ns	*

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

Se ha propuesto que el Cd es absorbido por las plantas por los transportadores de Ca (Clemens., 2006); lo que indica que existe antagonismo entre estos cationes. No obstante, en esta investigación, la adición de Cd a la solución nutritiva incrementó la concentración de Ca en vástago en 22.9%, en comparación con el testigo (**Figura 8**).

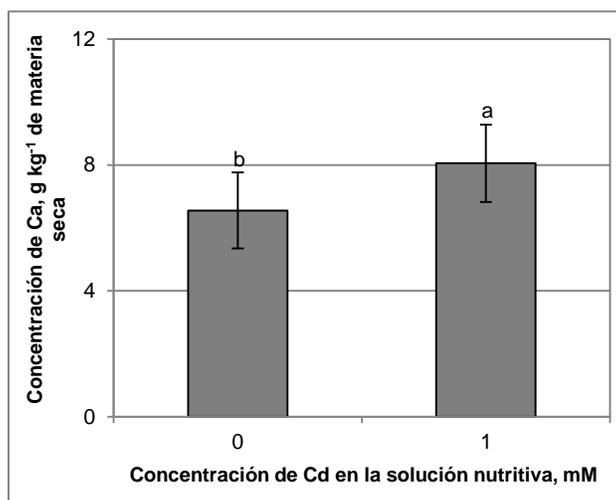


Figura 8. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

Si bien no se tienen diferencias estadísticas en la concentración de Ca en vástago por efecto del sustrato, la mayor concentración de este elemento se registró en plantas establecidas en tezontle (**Cuadro 11**). Al igual que en el caso de los nutrientes P y K, la concentración de Ca en solución en el sustrato no se relaciona con la concentración de este elemento en vástago.

Cuadro 11. Efecto del sustrato utilizado sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Sustrato	Concentración de Ca en vástago, g kg ⁻¹ de materia seca
Tezontle	8.14 a \pm 0.64
Tezontle + bagazo de caña	6.43 a \pm 0.38
Tezontle + cascarilla de arroz	6.99 a \pm 1.06
Tezontle + cachaza	7.66 a \pm 1.63

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$).

Las concentraciones de Ca obtenidas por efecto de la interacción de los factores de estudio (**Figura 9**), muestran que éstas fueron superiores cuando se suministró Cd a la solución nutritiva en todos los sustratos evaluados, en comparación con el control; dichos incrementos fueron de 27.23, 22.66, 7.41 y 34.37% en plantas con suministro de Cd y establecidas en tezontle, tezontle + bagazo, tezontle + cascarilla de arroz y tezontle + cachaza, respectivamente, en comparación con el testigo. Estos valores son similares a los reportados por Zhang *et al.* (2002), quienes evaluaron el efecto de Cd a en la solución nutritiva a concentraciones de 0 and 1 mg L⁻¹ sobre la concentración nutrimental en plántulas de cinco cultivares de trigo encontraron que en dos de ellos, Li 667 y Ailuyuang, la concentración de Ca en vástago fue superior en plantas tratadas con Cd en 37.5 y 8.3%, respectivamente.

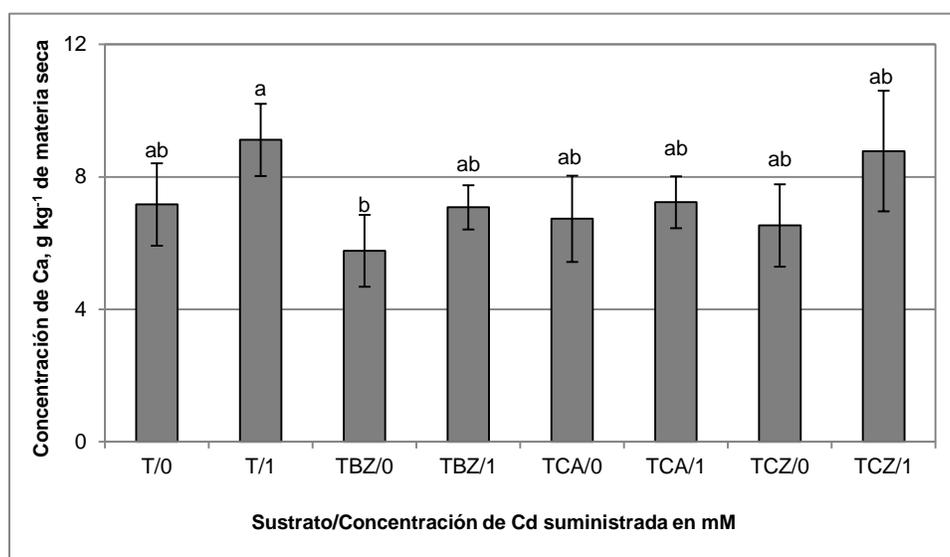


Figura 9. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Ca en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. T=Tezontle; TBZ= Tezontle + bagazo de caña; TCA=Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ= Tezontle + cachaza; 0= sin adición de Cd y 1= con adición de Cd 1mM.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

6.1.5. Magnesio

Las concentraciones de Mg en vástago de caña fueron influenciadas en forma altamente significativa por los factores de estudio y su interacción (**Cuadro 12**).

Cuadro 12. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Magnesio	**	**	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%.

Al igual que en Ca, la concentración de Mg en vástago fue mayor cuando se adicionó Cd a la solución nutritiva (**Figura 10**). Los estudios sobre interacciones que se presentan entre Mg y Cd han tenido resultados variables, en función de la especie. En hojas de soya, la concentración de Mg se redujo en 13.71, 7.86, y 6.22% en comparación con el testigo, al ser tratadas con 10, 100 y 200 μM de Cd, respectivamente (Dražić *et al.*, 2004). En 14 cultivares de repollo chino (*Brassica campestris* L. ssp. chinensis var. communis), la concentración de Mg en vástago disminuyó cuando las plantas fueron tratadas con $0.5 \mu\text{g mL}^{-1}$, en comparación con el testigo (Zhu *et al.*, 2004).

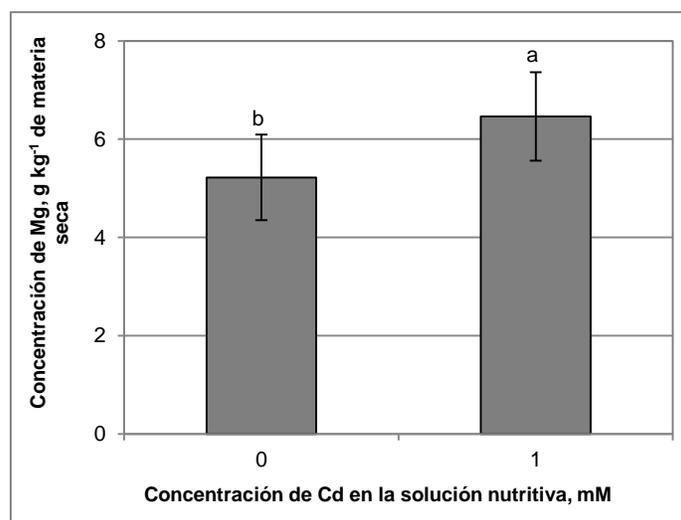


Figura 10. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

La concentración de Mg en vástago por efecto de sustrato, fue estadísticamente diferente registrándose la media más alta en el sustrato tezontle (**Figura 11**). Estos resultados son debidos probablemente, a la capacidad de retención de cationes de los tres sustratos conteniendo residuos agrícolas. A este respecto, Oberpaur *et al.* (2010) reporta que la presencia de materia orgánica, además de su efecto sobre la estructura, tiene influencia sobre la capacidad de intercambio catiónico, lo que reduce las pérdidas por lixiviación de elementos como potasio, calcio y magnesio. No obstante, estudios recientes han evidenciado la capacidad de sorción de metales pesados de subproductos agrícolas. Por ejemplo, cáscaras del fruto de palma de aceite han sido para la remoción de mercurio, plomo y cobre de soluciones acuosas (Wahi *et al.*, 2009); en tanto que cascarilla de arroz, aserrín de bagazo de caña y paja de trigo han sido evaluados para la remoción de zinc, hierro y cadmio en aguas residuales industriales (Osman *et al.*, 2010). Ogali *et al.* (2008), mostraron el potencial del mesocarpio de naranja en la remoción de Mg, Zn, Cu, Pb y Cd de aguas residuales, al inmovilizar el 56, 81, 71, 73 y 85% de éstos, respectivamente.

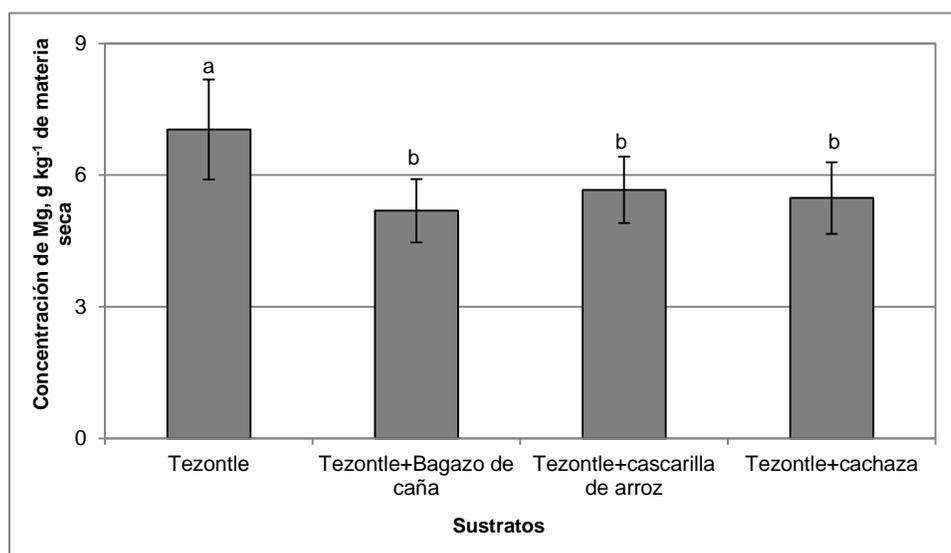


Figura 11. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

El efecto de la interacción de factores de estudio sobre la concentración de Mg en vástago (**Figura 12**), muestra las medias más altas siempre que se adicionó Cd al sustrato de crecimiento. Asimismo se evidencia nuevamente la mayor concentración de Mg cuando se utilizó sólo tezontle como sustrato.

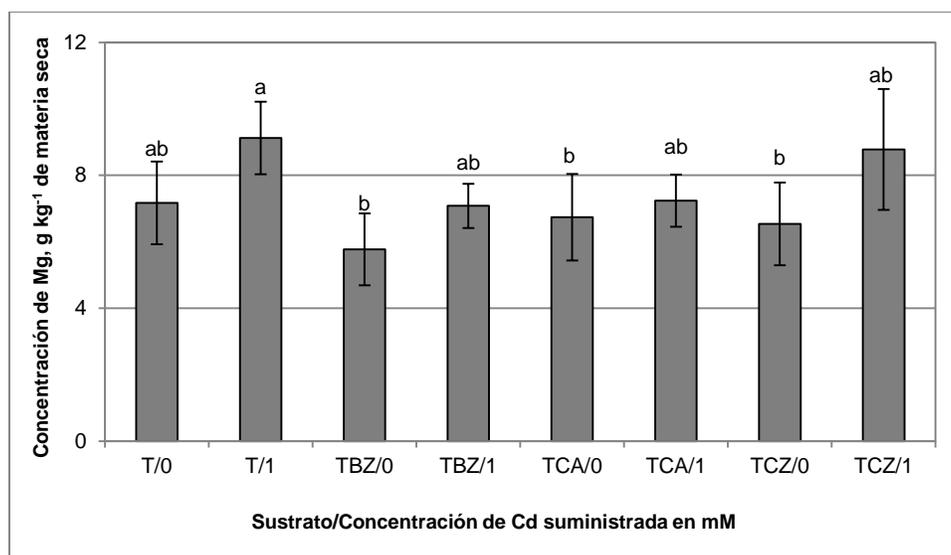


Figura 12. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Mg en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. T=Tezontle; TBZ= Tezontle + bagazo de caña; TCA=Tezontle +cascarilla de arroz; TCZ= Tezontle + cachaza; 0= sin adición de Cd y 1= con adición de Cd 1mM.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

6.1.6. Hierro

La concentración de hierro en vástago fue influenciada en forma altamente significativa por el sustrato empleado y por la interacción de éste con el factor cadmio (**Cuadro 13**).

Cuadro 13. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Fe en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Hierro	ns	**	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

En el **Cuadro 14**, se presentan las concentraciones de Fe en vástago por efecto del factor Cd, la cual fue no significativa. Sin embargo, la absorción de Cd puede competir por transportadores transmembranales de nutrientes esenciales (Clarkson y Luttge, 1989) como lo es el Fe. De la misma manera, se ha reportado un efecto antagónico del Fe sobre la absorción de Cd, en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), hierba mora (*Solanum nigrum* L.) y remolacha de hoja roja (*Beta vulgaris* var. cicla L.), en las cuales se demostró que la deficiencia de Fe induce la absorción de Cd, al promover cambios en la exudación de la raíz y en la rizósfera, lo cual incrementa la biodisponibilidad de Cd (Bao *et al.*, 2010).

Cuadro 14. Efecto del sustrato utilizado sobre la concentración de Fe en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Cd en la solución nutritiva, mM	Concentración de Fe en vástago, mg kg ⁻¹ de materia seca
0	120.01 a ± 30.30
1	116.76 a ± 12.70

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$).

La concentración de Fe más alta en vástago en función del sustrato empleado, muestra una relación inversa con el contenido soluble de este elemento en el sustrato (**Figura 13**). Así, en el sustrato tezontle + cachaza que tiene la menor concentración de Fe soluble (0.184 mg kg⁻¹) se registró la mayor concentración de este elemento en el sustrato.

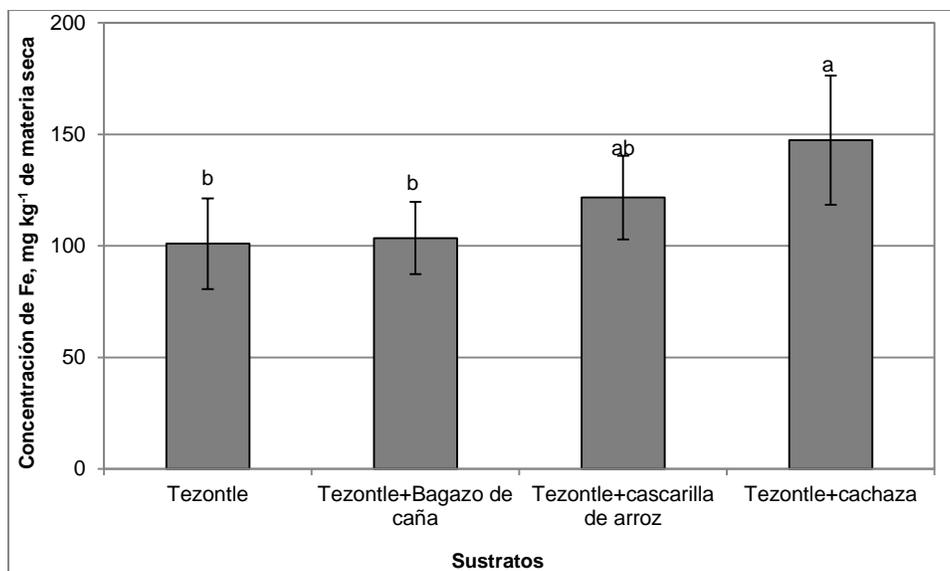


Figura 13. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de Fe en vástago de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

La interacción de factores de estudio influyó la concentración de Fe en vástago, teniéndose la media más alta en ausencia de Cd en la solución nutritiva empleando el sustrato TCZ (**Figura 14**).

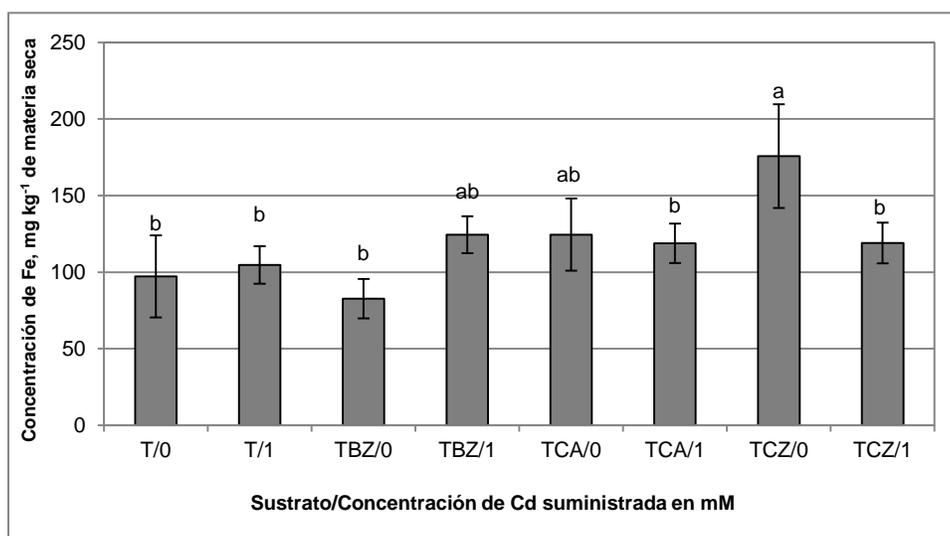


Figura 14. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Fe en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. T=Tezontle; TBZ= Tezontle + bagazo de caña; TCA=Tezontle + cascarilla de arroz; TCZ= Tezontle + cachaza; 0= sin adición de Cd y 1= con adición de Cd 1mM.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

En general, las concentraciones de Fe registradas en vástago en esta investigación son clasificadas como muy suficientes o bien como altas (McCray y Mylavarapu, 2010).

6.1.7. Zinc

Los factores de estudio sólo tuvieron efecto sobre la concentración de Zn en vástago, cuando se evaluó su interacción; es decir, no existieron efectos simples de éstos (**Cuadro 15**). De la misma manera que para Fe, el Cd no influyó sobre la concentración de Zn.

Cuadro 15. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Zn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Zinc	ns	ns	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

La diferencia en las concentraciones de Zn en vástago en función de la adición de Cd en la solución nutritiva fue mínima, mientras que el intervalo de concentración de Zn registrado en el vástago por efecto de sustrato osciló entre 37, 62 y 45 mg kg⁻¹ de materia seca (**Cuadro 16**).

La concentración de Zn en vástago fue superior en la combinación TCA sin adición de Cd a la solución nutritiva y con el sustrato T y adición de Cd; por el contrario, el menor valor se registró en el sustrato Tezontle + bagazo de caña TBZ sin Cd (**Figura 15**).

Cuadro 16. Efecto simple de los factores de estudio sobre la concentración de Zn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Cd en la solución nutritiva, mM	Concentración de Zn en vástago, mg kg⁻¹ de materia seca
0	39.84 a ± 5.64
1	41.17 a ± 4.46

Sustrato	Concentración de Zn en vástago, mg kg⁻¹ de materia seca
Tezontle	45.00 a ± 5.63
Tezontle + bagazo de caña	37.62 a ± 3.94
Tezontle + cascarilla de arroz	41.57 a ± 6.09
Tezontle + cachaza	37.85 a ± 3.56

Medias con letras iguales en cada factor de estudio, no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$).

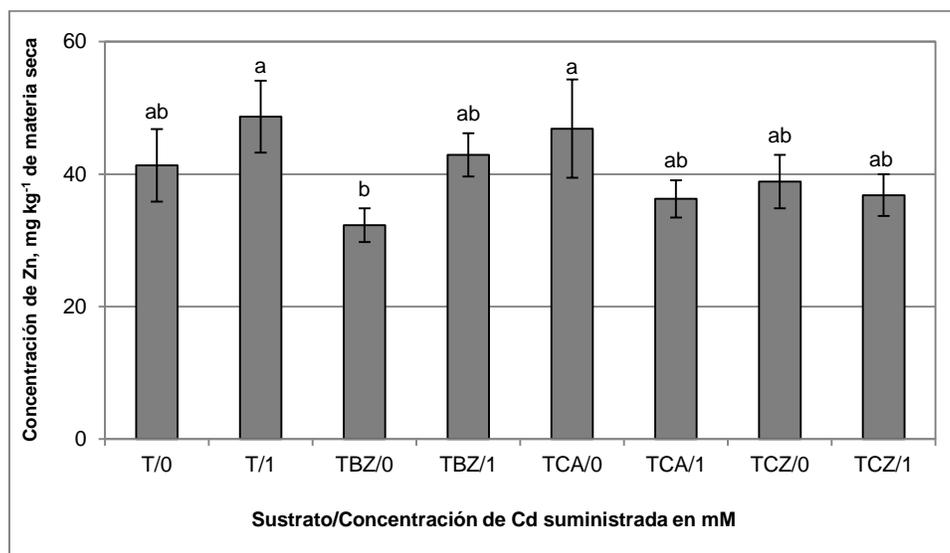


Figura 15. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Zn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

6.1.8. Manganeso

En el **Cuadro 17** se presenta los efectos de los factores de estudio y de la interacción de éstos sobre la concentración de Mn en vástago de caña de azúcar, donde se observa que sólo la adición de Cd en la solución nutritiva fue no significativa.

Cuadro 17. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Mn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Manganeso	ns	**	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

La adición de Cd a la solución nutritiva no tuvo efecto significativo sobre la concentración de Mn en el vástago (**Cuadro 18**).

Cuadro 18. Efecto simple de los factores de estudio sobre la concentración de Mn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Cd en la solución nutritiva, mM	Concentración de Mn en vástago, mg kg ⁻¹ de materia seca
0	93.66 a ± 24.96
1	86.08 a ± 24.41

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (P > 0.05).

La concentración de Mn en vástago por efecto de sustrato es mostrada en la **Figura 16**. Se observa que existió diferencia estadística significativa entre todos los sustratos, registrándose la media más alta en el sustrato conteniendo cachaza;

mientras que la menor concentración fue obtenida en el sustrato tezontle. La concentración de Mn soluble en el sustrato conteniendo cachaza fue la más alta (6.94 mg kg^{-1}); la cual se relaciona en forma positiva con la concentración de este elemento en vástago. Esta tendencia no se observa en el resto de los sustratos.

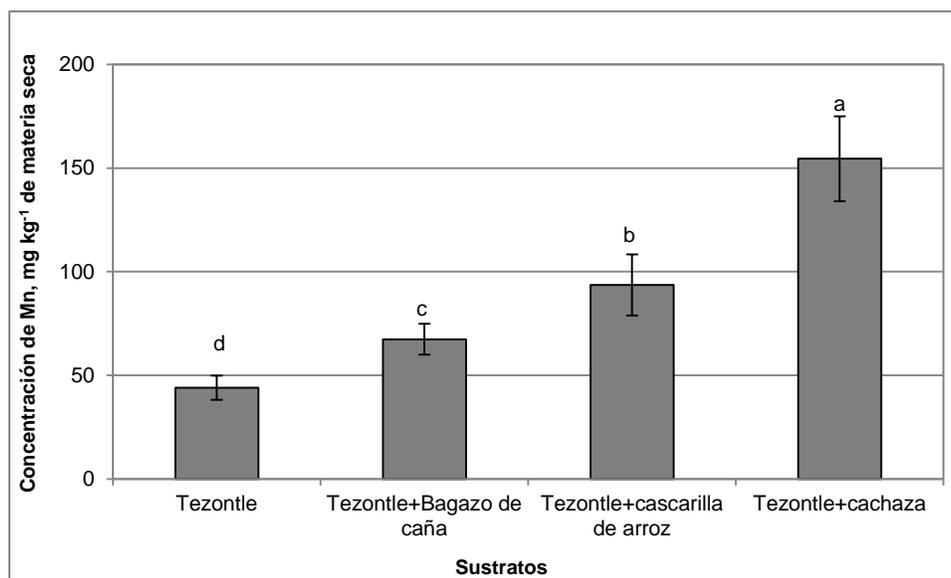


Figura 16. Efecto del sustrato empleado sobre la concentración de Mn en vástago de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

La tendencia en la concentración de Mn por efecto de la interacción de los factores de estudio (**Figura 17**), muestra las medias más altas en vástagos de plantas creciendo en el sustrato conteniendo cachaza; mientras que las menores en las plantas establecidas en tezontle. Estos resultados muestran relación positiva con los obtenidos por efecto de sustrato.

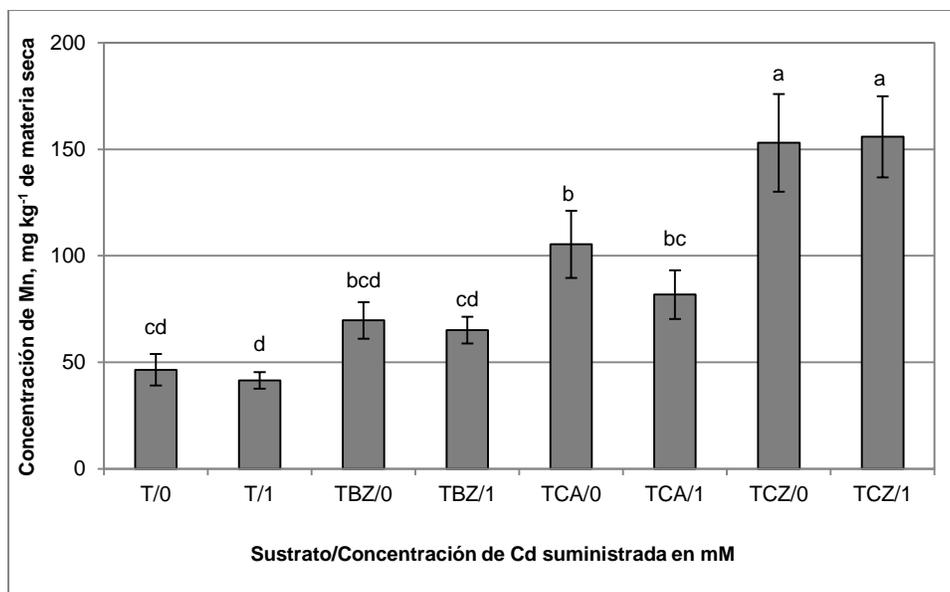


Figura 17. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Mn en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

6.1.9. Boro

La concentración de B sólo fue influenciada sólo por la interacción de los factores de estudio (**Cuadro 19**).

Cuadro 19. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de B en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Boro	ns	ns	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

Los resultados obtenidos por efecto simple de los factores de estudio se presentan en el **Cuadro 20**.

Cuadro 20. Efecto simple de los factores de estudio sobre la concentración de B en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Cd en la solución nutritiva, mM	Concentración de B en vástago, mg kg⁻¹ de materia seca
0	147.895 a ± 21.28
1	141.648 a ± 19.93

Sustrato	Concentración de B en vástago, mg kg⁻¹ de materia seca
Tezontle	146.896 a ± 24.64
Tezontle + bagazo de caña	138.455 a ± 18.54
Tezontle + cascarilla de arroz	146.523 a ± 23.57
Tezontle + cachaza	147.213 a ± 15.36

Medias con letras iguales en cada factor de estudio, no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$).

La concentración de B en vástago fue menor en plantas establecidas en tezontle y sin adición de Cd a la solución nutritiva, y en plantas creciendo en el sustrato conteniendo cachaza y con la adición de 1 mM de Cd en la solución nutritiva (**Figura 18**).

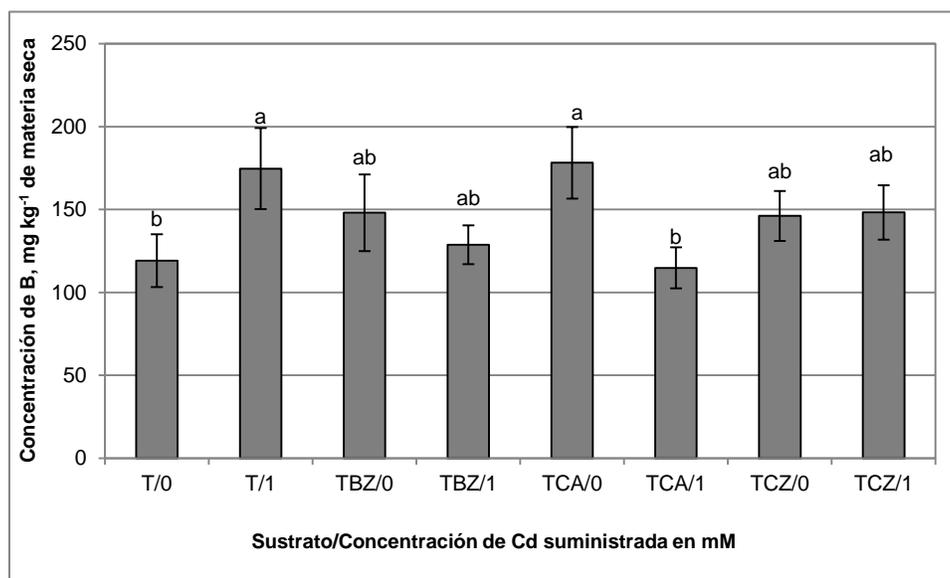


Figura 18. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de B en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

6.1.10. Sodio

Las concentraciones de Na en vástago de caña no muestran diferencias estadísticas ni por efecto simple de los factores de estudio ni de la interacción de éstos (**Cuadro 21**).

Cuadro 21. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Na en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Sodio	ns	ns	ns

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

Las medias de concentración de Na obtenidas en vástago por efecto simple de factores de estudio y de su interacción se presentan en el **Cuadro 22**. En los sustratos, las concentraciones de Na soluble conteniendo subproductos agrícolas osciló entre 11.92 y 19.23 mg kg⁻¹ (**Cuadro 5; Capítulo II**).

Cuadro 22. Efecto simple de los factores de estudio y su interacción sobre la concentración de Na en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Cd en la solución nutritiva, mM	Concentración de Na en vástago, mg kg⁻¹ de materia seca
0	802.60 a ± 104.41
1	903.70 a ± 125.88
Sustrato	Concentración de Na en vástago, mg kg⁻¹ de materia seca
Tezontle	818.91 a ± 105.74
Tezontle + bagazo de caña	855.71 a ± 144.83
Tezontle + cascarilla de arroz	845.73 a ± 128.54
Tezontle + cachaza	892.26 a ± 90.47
Sustrato X Cd en la solución nutritiva	Concentración de Na en vástago, mg kg⁻¹ de materia seca
Tezontle X 0 mM	706.83 a ± 44.49
Tezontle X 1 mM	930.98 a ± 121.02
Tezontle+bagazo de caña + 0 mM	737.11 a ± 91.84
Tezontle+bagazo de caña + 1 mM	974.31 a ± 167.43
Tezontle+cascarilla de arroz + 0 mM	844.36 a ± 149.86
Tezontle+cascarilla de arroz + 1 mM	847.10 a ± 111.44
Tezontle+cachaza + 0 mM	922.11 a ± 78.56
Tezontle+cachaza + 1 mM	862.40 a ± 103.02

Medias con letras iguales en cada factor de estudio y en la interacción de éstos, no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$).

6.1.11. Cadmio

La concentración de Cd en vástago fue influenciada por la adición de Cd a la solución nutritiva y por la interacción de la adición de Cd y el sustrato utilizado (**Cuadro 23**).

Cuadro 23. Efecto de los factores de estudio (sustrato y Cd en la solución nutritiva) y su interacción sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Nutrimento	Factor de estudio		
	Cd en la solución nutritiva	Sustrato	Cd en la solución nutritiva X Sustrato
Cadmio	**	ns	**

ns = no significativo; *significativo al 5%; **significativo al 1%

Las concentraciones de Cd registradas en vástago como consecuencia de la adición de 1 mM de este elemento a la solución nutritiva fue de 10.89 mg kg⁻¹. En diversos reportes ha sido demostrada la tolerancia de caña de azúcar al Cd. Sereno *et al.* (2006) reporta que al tratar plantas de esta especie durante 33 días con 500 µM de Cd (0.5 mM), concentración menor a la evaluada en esta investigación, se registraron concentraciones de Cd de 451 mg kg⁻¹ de materia seca (**Figura 19**). Asimismo, se han reportado efectos diferenciales de la adición de Cd en función de la forma en la que es abastecido el nitrógeno; Xie *et al.* (2009), investigaron recientemente el efecto de la forma de nitrógeno (NO₃⁻ vs NH₄⁺) sobre el crecimiento y absorción de Cd en *Thlaspi caerulescens* en experimentos establecidos en hidroponía y en rizo-cajas, encontrando que la nutrición con nitrato propició mayor acumulación de Cd que la nutrición con amonio, aun cuando el pH de la rizósfera fue menor en plantas tratadas con amonio.

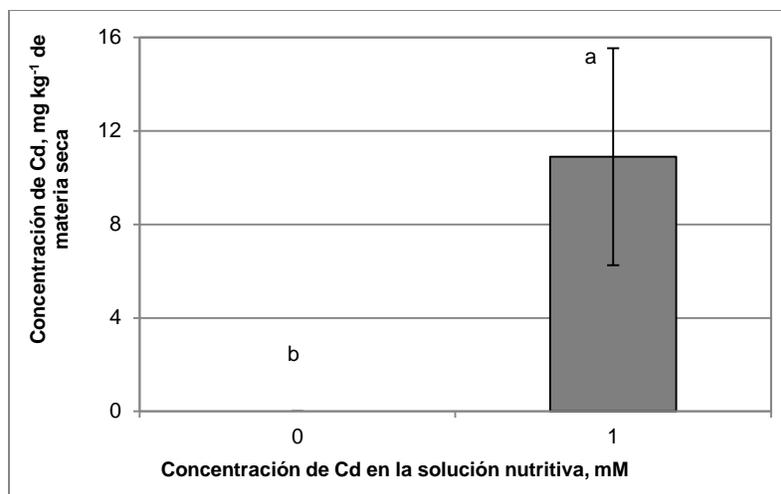


Figura 19. Efecto de la concentración de Cd en la solución nutritiva sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

Por efecto del sustrato empleado, se observa que existió mayor concentración de Cd en vástago, cuando las plantas fueron establecidas en un sustrato conteniendo residuos agrícolas (**Cuadro 24**). Los valores de concentración de Cd en estos sustratos superaron considerablemente al valor registrado en plantas establecidas en tezontle; no obstante, las diferencias estadísticas no fueron significativas debido a la variabilidad presentada entre plantas tratadas y no tratadas con Cd.

Cuadro 24. Efecto simple del factor sustrato sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086.

Sustrato	Concentración de Cd en vástago, mg kg ⁻¹ de materia seca
Tezontle	2.112 a \pm 1.19
Tezontle + bagazo de caña	8.267 a \pm 6.25
Tezontle + cascarilla de arroz	6.308 a \pm 4.39
Tezontle + cachaza	5.100 a \pm 3.22

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$).

Los resultados de concentración de Cd en vástago por efecto de la interacción de factores de estudio, muestra, como es de esperarse, presencia de este elemento en plantas tratadas con 0.1 mM de Cd en la solución nutritiva, en particular, cuando se desarrollaron en sustratos conteniendo residuos agrícolas (**Figura 20**).

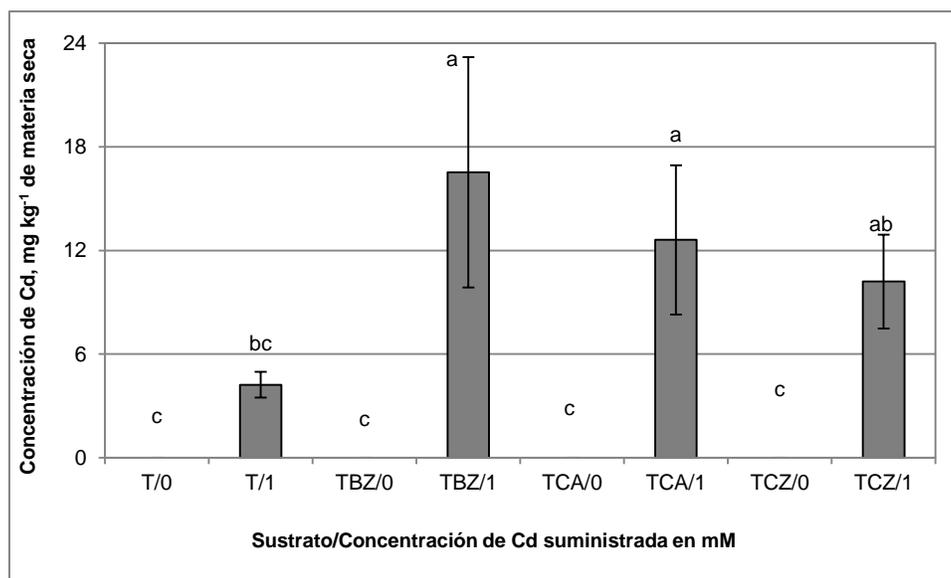


Figura 20. Efecto de la interacción sustrato y concentración de Cd sobre la concentración de Cd en parte aérea de caña de azúcar variedad CP722086. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Barras indican \pm DE.

VII. CONCLUSIONES

El factor Cd en la solución nutritiva no afectó las concentraciones de N, P, Zn, Mn, B y Na en vástagos de caña de azúcar. La adición de 1 mM de Cd a la solución nutritiva tuvo efectos significativos en la concentración de los cationes esenciales del grupo de macronutrientes; por un lado incrementó la concentración de Ca y Mg en parte aérea; por el otro, redujo la concentración de K. Asimismo, el Cd fue detectado sólo en las plantas tratadas con este elemento.

Los sustratos evaluados no tuvieron efecto en las concentraciones de Ca, Zn, B, Na y Cd en vástagos de caña de azúcar. Vástagos de plantas establecidas en el

sustrato consistente en la mezcla de tezontle y cachaza registraron las mayores concentraciones de P, K, Fe y Mn. En el sustrato conteniendo cascarilla de arroz se registraron las mayores concentraciones de N en vástago. Es importante destacar que el uso de tezontle como sustrato, redujo significativamente las concentraciones de N, P, K, Fe y Mn en vástago.

La ausencia de Cd en la solución nutritiva y el sustrato consistente en tezontle y cachaza, ocasionó mayores concentraciones de P, K y Fe en vástago. Asimismo, este sustrato con la adición de Cd ocasionó mayor concentración de Mn en vástagos. En el sustrato consistente en la mezcla de tezontle y cascarilla de arroz, sin la adición de Cd a la solución nutritiva, se observaron las concentraciones más altas de N y B en vástago. En lo que respecta al Cd, este elemento registró la mayor concentración en vástagos tratados con este elemento y cuando se utilizó como sustrato tezontle y bagazo de caña

VIII. LITERATURA CITADA

- Alcántar, G. G. y Sandoval V., M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Publicación especial No. 10. Chapingo México. 156 p.
- Aldana, C. V. H. 2006. Evaluación de dos madurantes en la caña de azúcar (*Saccharum* spp) de la variedad CP 722086, en Santo Domingo, Suchitepéquez. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos. Guatemala, Gt. 142p.
- Baird, C. 2001. Química Ambiental. Reverte 622 pp.
- Bao, T.; Sun, L.-N. and Sun, T.-H. 2010. Evaluation of iron on cadmium uptake by tomato, morel and leaf red beet in hydroponic culture. *Journal of Plant Nutrition* 33(5): 713-723.
- Bautista, Z.F. 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Universidad Autónoma de Yucatán. 109pp.
- Ciećko, Z.; Kalembasa, S.; Wyszowski, M. and Rolka, E. 2004. Effect of Soil Contamination by Cadmium on Potassium Uptake by Plants. *Pol. J. Environ. Stud.* 13(3): 333-337
- Clarkson, D. T. and Luttge, U. 1989. Mineral nutrition. Divalent cations, transport and compartmentalization. *Prog. Bot.* 51: 93-112.
- Clemens, S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88: 1707–1719.
- Comparini A., S. D. 2006. Evaluación de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp) en el Ingenio La Unión, Santa Lucía, Cotzumalguapa. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos. Guatemala, Gt. 131 p.
- Cruz-Guzmán, A. M. 2007. La contaminación de suelos y agua. Universidad de Sevilla. 243 pp.
- Di Toopi, L.S and Gabrielli, R. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41:105-130.
- Dražić, G.; Mihailovi, N. and Stojanovi, Z. 2004. Cadmium toxicity: the effect on macro- and micro-nutrient contents in soybean seedlings. *Biologia Plantarum* 48 (4): 605-607.
- Hettiarachchi, G. M. and Pierzynski, G. M. 1999. Effect of phosphorus and other soil amendments on soil lead, cadmium and zinc bioavailability, *In: Proc. Extended Abstr., fifth Int. Conf. on the Biogeochem. Trace Elements (ICOBTE), Vienna, Austria, 11-15 July, 1999. Int. Soc. For Trace Element Res., Vienna, Austria, pp. 514-515.*
- Kashem, A. and Kawai, S. 2007. Alleviation of cadmium phytotoxicity by magnesium in Japanese mustard spinach. *Soil Science and Plant Nutrition* 53: 246–251.
- Lauwerys R., R. 1994. Toxicología industrial e intoxicaciones profesionales. Elsevier España. 63 pp.
- Liu, Ch.-H.; Huang, W.-D. and Kao, Ch. H. 2011. The decline in potassium concentration is associated with cadmium toxicity of rice seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum* DOI: 10.1007/s11738-011-0846-1

- McCray, J. M. and Mylavarapu, R. 2010. Sugarcane nutrient management using leaf analysis. Florida Cooperative Extension Service Pub. SS-AGR-335. (<http://edis.ifas.ufl.edu/ag345>) Consultado el: 20 de Noviembre de 2011.
- Oberpaur, Ch.; Puebla, V.; Vaccarezza, F. and Arévalo, M. E. 2010. Preliminary substrate mixtures including peat moss (*Sphagnum magellanicum*) for vegetable crop nurseries. *Cienc. Inv. Agr.* 37(1): 123-132.
- Ogali, R. E.; Akaranta, O. and Arigiguzo, V. O. 2008. Removal of some metal ions from aqueous solution using orange mesocarp. *African Journal of Biotechnology* 7(17): 3073-3076.
- Osman, H. E.; Badwy, R. K. and Ahmad, H. F. 2010. Usage of some agricultural by-products in the removal of some heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Phytology* 2(3): 51–62.
- Ogawa, I.; Nakanishi, H.; Mori, S. and Nishizawa, K. N. 2009. Time course analysis of gene regulation under cadmium stress in rice. *Plant and Soil* 325: 97-108.
- Pernia, B., De Sousa, A., Reyes, R y Castrillo, M. 2008. Biomarcadores de contaminación por Cadmio en las plantas. *Interciencia* 33 (2): 112-119.
- Prasad V, M.N. 2004. Heavy metal stress in plants: from biomolecules to ecosystem. Springer. 462 pp.
- Sajwan, K. S.; Paramasivam, S.; Richardson, J. P. and Alva, A. K. 2002. Phosphorus alleviation of cadmium phytotoxicity. *Journal of Plant Nutrition* 25(9): 2027-2034.
- SAS. 2003. SAS/STAT user's guide. Release 9.1 SAS Institute. Cary, NC. U. S. A.
- Sereno, M. L.; Almeida, R. S.; Nishimura, D. S. and Figueira, A. 2006. Response of sugarcane to increasing concentrations of copper and cadmium and expression for metallothionein genes. *J. Plant Physiol.* 164(11): 1499-1515.
- Steiner, A. 1984. The universal nutrient solution. *In: ISOSC Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. The Netherlands.* pp. 633-649.
- Steiner, A. and van Winden, H. 1970. Recipe for ferric salts of ethylenediaminetetraacetic acid. *Plant Physiol.* 46: 862-863.
- Vangronsveld, J. and Cunningham, S. D. 1998. Introduction to the concepts. *In: Vangronsveld J, Cunningham SD (Eds.), Metal-Contaminated Soils. In Situ Inactivation and Phytoremediation.* Springer, Berlin, pp. 1-15.
- Wahi, R.; Ngaini, Z. and Jok, V. U. 2009. Removal of mercury, lead and copper from aqueous solution by activated carbon from empty fruit bunch. *World Applied Sciences Journal* 5: 84-91
- Xie, H. L.; Jiang, R. F.; Zhang, F. S., McGrath, S. P. and Zhao, F. J. 2009. Effect of nitrogen form on the rhizosphere dynamics and uptake of cadmium and zinc by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Soil* 318: 205–215.

- Zérega, M. L.; Hernandez, T.; Velladares, J. 1991. Evaluación de 14 variedades de caña de azúcar en dos suelos afectados por sales bajo condiciones de umbráculo. *Caña de Azúcar* 9(2): 81-98.
- Zhang, G.; Fukami, M. and Sekimoto, H. 2002. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage *Field Crops Research* 77: 93–98.
- Zhu, Z.-J.; Sun G.-W.; Fang, X.-Z.; Qian, Q.-Q. and Yang, X.-E. 2004. Genotypic differences in effects of cadmium exposure on plant growth and contents of cadmium and elements in 14 cultivars of baicai. *Journal of Environmental Science and Health. Part. B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes* 39(4): 675-687.