



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

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

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGÍA VEGETAL**

## **FOSFITO Y SU RELACIÓN CON FACTORES DE ESTRÉS ABIÓTICO EN CAÑA DE AZÚCAR**

**CÉSAR ANTONIO CASASOLA ELIZONDO**

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

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO**

**2022**



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

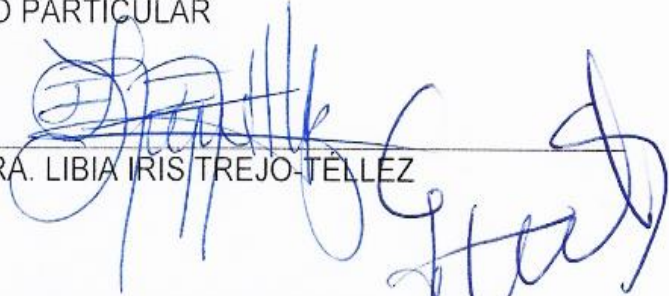
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Fosfito y su Relación con Factores de Estrés Abiótico en Caña de Azúcar**, realizada por el estudiante: **César Antonio Casasola Elizondo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA

  
DRA. LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ

ASESOR

  
DR. GABRIEL ALCÁNTAR-GONZÁLEZ

ASESOR

  
DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ-MERINO

ASESORA

  
DRA. YOLANDA LETICIA FERNÁNDEZ-PAVÍA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, octubre de 2022

# FOSFITO Y SU RELACIÓN CON FACTORES DE ESTRÉS ABIÓTICO EN CAÑA DE AZÚCAR

César Antonio Casasola Elizondo, D.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## RESUMEN

El estrés abiótico integra a un conjunto de condiciones adversas que impactan de forma negativa en los orgánulos celulares de las plantas. Recientemente, la aplicación de bioestimulantes en ciertos cultivos agrícolas ha mejorado el estado fisiológico, la absorción nutrimental, sin embargo, continúa siendo un reto conocer la acción específica de estos insumos para disponer de una agricultura más sostenible y resiliente. Fosfito (Phi;  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) una forma reducida de fosfato (Pi;  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), emerge como un novedoso bioestimulante que confiere tolerancia al estrés abiótico. Motivo por el que, en la presente investigación se estudió el efecto de Phi en situación de estrés abiótico en crecimiento, absorción nutrimental, contenido de pigmentos fotosintéticos y aminoácidos libres totales en raíz, tallo y hoja de tres cultivares de caña de azúcar (CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204) como planta modelo. Por lo que, se realizaron dos ensayos experimentales en condiciones hidropónicas, el primero utiliza agua como sustrato y documenta el efecto bioestimulante de la adición de Phi a partir de  $\text{H}_3\text{PO}_3^-$  a una concentración correspondiente al 15% del P ( $0.0375 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$ ) de la solución nutritiva de Steiner (SNS) al 25%, sometidas a estrés salino (150 mM NaCl) y estrés por sequía (0.83 mM PEG) donde se incrementó en un 9.67% la altura de planta en el cv. MotzMex 92-207; El segundo experimento uso grava de tezontle como sustrato y la adición vía radical de dos dosis de Phi a partir de  $\text{H}_3\text{PO}_3^-$  a una concentración correspondiente al 10 y 20% del P ( $0.037$  y  $0.070 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$ ) a la SNS al 35% bajo estrés por sombra (malla calibre 50%) e incrementó en un 9.14% la concentración foliar de P a una concentración de 20% de P como Phi en el cv. CP 72-2086.

**Palabras clave:** Fosfito, bioestimulante, estrés abiótico, salinidad, déficit hídrico, sombra, caña de azúcar, CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204.

# PHOPSHITE AND ABIOTIC STRESS IN SUGARCANE

César Antonio Casasola Elizondo, D.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## ABSTRACT

Abiotic stress integrates a set of adverse conditions that negatively impact the cellular organs of plants. Recently, the application of biostimulants in certain agricultural crops has improved the physiological state, nutritional absorption and had a positive impact on yield, however, it remains a challenge to know the specific action of these inputs to discard a more sustainable and resilient agriculture. Phosphite (Phi;  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ), a reduced form of phosphate (Pi;  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), emerges as a novel biostimulant that provides tolerance to abiotic stress. Reason why, in the present investigation, was studied the effect of Phi in a situation of abiotic stress on growth, nutritional absorption, content of photosynthetic pigments and total free amino acids in root, stem and leaf of three sugarcane cultivars (CP 72-2086, MotzMex 92-207 and COLPOS CTMex 05-204) as a model plant. Therefore, two experimental tests were carried out under hydroponic conditions, the first one uses water as a substrate and documents the biostimulant effect of the addition of Phi from  $\text{H}_3\text{PO}_3^-$  at a concentration corresponding to 15% of P ( $0.0375 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$ ) of Steiner's nutrient solution (SNS) at 25%, suffered salt stress (150 mM NaCl) and drought stress (0.83 mM PEG) where plant height increased by 9.67% in cv. Motz Mex 92-207; The second experiment used tezontle gravel as a substrate and the radical addition of two doses of Phi from  $\text{H}_3\text{PO}_3^-$  at a concentration corresponding to 10 and 20% of P ( $0.037$  and  $0.070 \text{ mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$ ) to the SNS at 35% under shade stress (50% mesh size) and increased the foliar concentration of P by 9.14% at a concentration of 20% P as Phi in cv. CP 72-2086.

**Key words:** Phosphite, biostimulant, abiotic stress, salinity, water deficit, shade, sugarcane, CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204.

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el financiamiento **738091** otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

Al **Colegio de Postgraduados (COLPOS)** Campus Montecillo, por facilitarme las instalaciones y fomentar el interés por la investigación agrícola de calidad.

Al **Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad – Orientación: Fisiología Vegetal** por integrar mi formación profesional.

Al **Consejo Particular** del presente trabajo de investigación, a la **Dra. Libia Iris Trejo Téllez**, al **Dr. Gabriel Alcántar González**, al **Dr. Fernando Carlos Gómez Merino** y la **Dra. Yolanda Leticia Fernández Pavía**, por su disposición, experiencia y orientación en mi formación, así como, el tiempo dedicado en la revisión y corrección del presente trabajo.

Un agradecimiento especial a mi **Familia y Amigos**, por el apoyo incondicional durante estos años.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
LISTAS DE CUADROS .....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
Fosfito y su aplicación en la agricultura.....	3
Estrés abiótico en plantas superiores .....	4
Estrés salino y su impacto en la planta .....	5
Estrés por déficit hídrico.....	6
Estrés por baja intensidad luminosa.....	7
Estrés y metabolismo .....	8
Historia de la caña de azúcar .....	11
Caña de azúcar en México .....	13
Metabolismo caña de azúcar .....	20
<b>CAPITULO I. FOSFITO, ESTRÉS SALINO Y POTENCIAL OSMÓTICO EN CAÑA DE AZÚCAR .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 RESUMEN .....</b>	<b>23</b>
<b>1.2 ABSTRACT .....</b>	<b>24</b>
<b>1.3 OBJETIVO.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4 HIPÓTESIS.....</b>	<b>25</b>
<b>1.5 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
1.5.1. Localización área experimental .....	25
1.5.2. Material vegetal.....	25
1.5.3. Manejo del experimento.....	26
1.5.4. Descripción de tratamientos .....	27
1.5.5. Diseño experimental .....	28
1.5.6. Variables evaluadas.....	28
1.5.7. Análisis estadístico .....	32

<b>1.6 RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
1.6.1. Parámetros de crecimiento .....	33
1.6.2. Concentraciones nutrimentales y de Na en el cv. CP 72-2086 .....	42
1.6.3. Concentraciones nutrimentales y de Na en el cv. MotzMex 92-207 .....	51
1.6.4. Concentraciones nutrimentales y de Na en el cv. COLPOSCTMex 05-204.....	59
1.6.5. Análisis de concentraciones foliares de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> con componentes principales .....	66
1.6.6. Concentración foliar de pigmentos fotosintéticos.....	72
1.6.7. Concentración foliar de aminoácidos .....	77
1.6.8. Curvas de crecimiento de hojas.....	79
1.6.9. Parámetros fotosintéticos .....	84
<b>1.7 DISCUSIÓN .....</b>	<b>86</b>
1.7.1. Estrés abiótico .....	86
1.7.2. Bioestimulación.....	87
1.7.3. Interacciones entre bioestimulación y estrés abiótico .....	89
<b>1.8 CONCLUSIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>CAPÍTULO II. FOSFITO E INTENSIDAD LUMINOSA EN CAÑA DE AZÚCAR .....</b>	<b>99</b>
<b>2.1 RESUMEN .....</b>	<b>99</b>
<b>2.2 ABSTRACT .....</b>	<b>100</b>
<b>2.3 OBJETIVO.....</b>	<b>101</b>
<b>2.4 HIPÓTESIS.....</b>	<b>101</b>
<b>2.5 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>101</b>
2.5.1. Localización área experimental .....	101
2.5.2. Material vegetal.....	101
2.5.3. Manejo del experimento.....	101
2.5.4. Descripción de tratamientos .....	103
2.5.5. Diseño experimental .....	104
2.5.6. Variables evaluadas.....	104
2.5.7. Análisis estadístico .....	107
<b>2.6 RESULTADOS .....</b>	<b>108</b>

2.6.1. Parámetros de crecimiento .....	108
2.6.2. Concentración nutrimental en hoja cv. CP 72-2086.....	117
2.6.3. Concentración nutrimental en hoja cv. MotzMex 92-207 .....	117
2.6.4. Concentración nutrimental en hoja cv. COLPOS CTMex 05-204 .....	118
2.6.5. Análisis de concentraciones foliares de nutrimentos con componentes principales.....	124
2.6.6. Concentración foliar de pigmentos fotosintéticos.....	130
2.6.7. Concentración foliar de aminoácidos .....	135
2.6.8. Curvas de crecimiento de hojas.....	137
2.6.9. Parámetros fotosintéticos .....	142
<b>2.7 DISCUSIÓN .....</b>	<b>144</b>
2.7.1. Estrés abiótico .....	144
2.7.2. Bioestimulante .....	146
2.7.3. Interacción entre bioestimulación y estrés abiótico.....	146
<b>2.8 CONCLUSIONES .....</b>	<b>150</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>152</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>153</b>



## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Clasificación taxonómica de la caña de azúcar. ....	12
<b>Cuadro 2.</b> Producción, área cosechada y rendimiento de los principales países productores de caña de azúcar, 2016-2018. ....	15
<b>Cuadro 3.</b> Tasa de crecimiento media anual, mundial (TCMA, 2010-2018). ....	16
<b>Cuadro 4.</b> Área sembrada, área cosechada, producción y rendimiento medio de las principales entidades federativas productoras de caña de azúcar en México, modalidad temporal, 2016-2019. ....	18
<b>Cuadro 5.</b> Área sembrada, área cosechada, producción y rendimiento medio de las principales entidades federativas productoras de caña de azúcar en México, modalidad riego, 2016-2019. ....	18
<b>Cuadro 6.</b> Cultivares nacionales y extranjeros imperantes en México respecto a la superficie cultivada. ....	19
<b>Cuadro 1. 1.</b> Solución nutritiva universal de Steiner a 25% de su concentración. ....	27
<b>Cuadro 1. 2.</b> Potencial osmótico en las SNS en cada uno de los seis tratamientos evaluados. ....	28
<b>Cuadro 1. 3.</b> Datos climáticos al momento de realizar lecturas de fotosíntesis. ....	32
<b>Cuadro 1. 4.</b> Variables de crecimiento en plantas del cultivar CP 72-2086 de caña de azúcar. ....	37
<b>Cuadro 1. 5.</b> Variables de crecimiento en plantas del cultivar MotzMex 92-207 de caña de azúcar. ....	39
<b>Cuadro 1. 6.</b> Variables de crecimiento en plantas del cultivar COLPOS CTMex 05-204 de caña de azúcar. ....	41
<b>Cuadro 1. 7.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés. ....	45
<b>Cuadro 1. 8.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en tallos de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés. ....	47

<b>Cuadro 1. 9.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en raíces de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	49
<b>Cuadro 1. 10.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	53
<b>Cuadro 1. 11.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en tallos de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	55
<b>Cuadro 1. 12.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en raíces de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	57
<b>Cuadro 1. 13.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	60
<b>Cuadro 1. 14.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en tallos de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	62
<b>Cuadro 1. 15.</b> Concentración de nutrimentos y de Na <sup>+</sup> en raíces de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	64
<b>Cuadro 1. 16.</b> Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	74
<b>Cuadro 1. 17.</b> Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	75
<b>Cuadro 1. 18.</b> Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en hojas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	76

<b>Cuadro 1. 19.</b> Concentración foliar de aminoácidos libres totales ( $\eta$ M) en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	77
<b>Cuadro 1. 20.</b> Concentración foliar de aminoácidos libres totales ( $\eta$ M) en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	78
<b>Cuadro 1. 21.</b> Concentración foliar de aminoácidos libres totales ( $\eta$ M) en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.....	79
<b>Cuadro 1. 22.</b> Modelos de cinética de crecimiento de hoja de plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo factores de estrés (salino e hídrico) tratadas con fosfito.....	80
<b>Cuadro 1. 23.</b> Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. CP 72-2086 tratadas con fosfito y sometida a factores de estrés.....	84
<b>Cuadro 1. 24.</b> Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con fosfito y sometida a factores de estrés.....	85
<b>Cuadro 1. 25.</b> Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204 tratadas con fosfito y sometida a factores de estrés.....	85
<b>Cuadro 2. 1.</b> Solución nutritiva universal de Steiner a 35% de su concentración.....	103
<b>Cuadro 2. 2.</b> Datos climáticos condiciones suficiencia de luz al momento de realizar lecturas de fotosíntesis.....	107
<b>Cuadro 2. 3.</b> Datos climáticos condiciones de deficiencia de luz al momento de realizar lecturas de fotosíntesis.....	107
<b>Cuadro 2. 4.</b> Variables de crecimiento registradas en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.....	111
<b>Cuadro 2. 5.</b> Variables de crecimiento registradas en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.....	113
<b>Cuadro 2. 6.</b> Variables de crecimiento registradas en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.....	115

<b>Cuadro 2. 7.</b> Concentración foliar de nutrimentos en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	119
<b>Cuadro 2. 8.</b> Concentración foliar de nutrimentos en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	121
<b>Cuadro 2. 9.</b> Concentración foliar de nutrimentos en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	123
<b>Cuadro 2. 10.</b> Concentración foliar ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	132
<b>Cuadro 2. 11.</b> Concentración foliar ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	133
<b>Cuadro 2. 12.</b> Concentración foliar ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en plantas de caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	134
<b>Cuadro 2. 13.</b> Concentración foliar ( $\eta\text{M}$ ) de aminoácidos libres totales en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	135
<b>Cuadro 2. 14.</b> Concentración foliar ( $\eta\text{M}$ ) de aminoácidos libres totales en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	135
<b>Cuadro 2. 15.</b> Concentración foliar ( $\eta\text{M}$ ) de aminoácidos libres totales en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito. ....	136
<b>Cuadro 2. 16.</b> Modelos de cinética de crecimiento de hoja de plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo dos condiciones de luminosidad tratadas con fosfito. ....	137
<b>Cuadro 2. 17.</b> Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. CP 72 2086 tratadas con fosfito y sometida a dos intensidades luminosas. ....	142

<b>Cuadro 2. 18.</b> Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. MotzMex 92 207 tratadas con fosfito y sometida a dos intensidades luminosas. ....	143
<b>Cuadro 2. 19.</b> Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05 204 tratadas con fosfito y sometida a dos intensidades luminosas. ....	143

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Países responsables del 80% de la producción mundial de caña de azúcar, 2016-2018 .....	14
<b>Figura 2.</b> Estados productores de caña de azúcar ( <i>Saccharum spp.</i> ) en México.....	17
<b>Figura 3.</b> Fijación de carbono en células del mesófilo y del haz de la vaina en plantas con metabolismo fotosintético $C_4$ como lo es la caña de azúcar. Adaptado de Yamori <i>et al.</i> 2013. ....	22
<b>Figura 1. 1.</b> Eliminación de hojas maduras de caña de azúcar en sistema de raíz flotante, para evitar la proliferación de hongos.....	26
<b>Figura 1. 2.</b> Curva estándar de leucina para cuantificar aminoácidos totales.....	31
<b>Figura 1. 3.</b> Plantas de tres cultivares de caña de azúcar bajo dos concentraciones de Phi ( $H_2PO_3^-$ ) a partir de ácido fosforoso ( $H_3PO_3$ ). Sin y con Phi (0 y $0.0375 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ ). ....	33
<b>Figura 1. 4.</b> Plantas de tres cultivares de caña de azúcar bajo dos concentraciones de Phi ( $H_2PO_3^-$ ) a partir de ácido fosforoso ( $H_3PO_3$ ) en presencia de estrés salino (150 mM de NaCl). Sin y con Phi (0 y $0.0375 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ ). ....	34
<b>Figura 1. 5.</b> Plantas de tres cultivares de caña de azúcar bajo dos concentraciones de Phi ( $H_2PO_3^-$ ) a partir de ácido fosforoso ( $H_3PO_3$ ) en presencia de estrés hídrico (5% PEG 6000). Sin y con Phi (0 y $0.0375 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ ). ....	35
<b>Figura 1. 6.</b> Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 .....	67
<b>Figura 1. 7.</b> Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086. ....	68
<b>Figura 1. 8.</b> Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 .....	69
<b>Figura 1. 9.</b> Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207.....	70

<b>Figura 1. 10.</b> Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) en hojas de caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204.....	71
<b>Figura 1. 11.</b> Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204.....	72
<b>Figura 1. 12.</b> Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 tratadas con fosfito y sometidas a factores de estrés.....	81
<b>Figura 1. 13.</b> Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con fosfito y sometidas a factores de estrés. ....	82
<b>Figura 1. 14.</b> Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con fosfito y sometidas a factores de estrés.....	83
<b>Figura 2. 1.</b> Manejo experimento investigación caña de azúcar .....	102
<b>Figura 2. 2.</b> Curva estándar para cuantificar aminoácidos totales.....	106
<b>Figura 2. 3.</b> Plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito (Phi, H <sub>2</sub> PO <sub>3</sub> ). ....	108
<b>Figura 2. 4.</b> Raíces de plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito (Phi, H <sub>2</sub> PO <sub>3</sub> ). ....	109
<b>Figura 2. 5.</b> Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086.. .....	125
<b>Figura 2. 6.</b> Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086. ....	126
<b>Figura 2. 7.</b> Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207. ....	127
<b>Figura 2. 8.</b> Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207.....	128

<b>Figura 2. 9.</b> Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) en hojas de caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204.....	129
<b>Figura 2. 10.</b> Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204.....	130
<b>Figura 2. 11.</b> Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. CP 72 2086 tratadas con fosfito y sometidas a dos intensidades luminosas. ..	139
<b>Figura 2. 12.</b> Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con fosfito y sometidas a dos intensidades luminosas. ....	140
<b>Figura 2. 13.</b> Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05 204 tratadas con fosfito y sometidas a dos intensidades luminosas .....	141



## INTRODUCCIÓN GENERAL

La asequibilidad de los alimentos para todas las personas es crucial para la paz y la prosperidad mundial. Durante el siglo XX, la producción y el mejoramiento biotecnológico de distintos cultivos ha logrado un enorme crecimiento en la producción y productividad agrícolas mediante el desarrollo de variedades y prácticas agronómicas de alto rendimiento. Sin embargo, los alimentos aún no están disponibles para todos, y estamos lejos de alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible de la Organización Mundial de las Naciones Unidas de hambre cero para el año 2030.

Teniendo en cuenta el crecimiento constante de la población mundial, la cual, según datos de la ONU para el año 2030 alcanzará 8,500 millones de habitantes, la susceptibilidad de los cultivos agrícolas a variaciones climáticas, los recursos naturales finitos, el incremento en los costos de producción y la creciente demanda de insumos agrícolas, es imperante incorporar nuevas estrategias encaminadas al logro de una agricultura sostenible.

En este contexto, la aplicación de bioestimulantes se considera una práctica agrícola novedosa y respetuosa con el medio ambiente, que combina dos conceptos que de otro modo discreparían, la intensificación de cultivos y la sostenibilidad. Empero, existen ciertos obstáculos que restringen el uso de bioestimulantes en campo, como el desarrollo de fórmulas y dosis adecuadas, así como tiempos de aplicación óptimos para los distintos cultivos agrícolas.

Debido a que el modo de acción de cada bioestimulante es muy preciso, difícilmente se puede encontrar uno que sea eficaz en la promoción del crecimiento, en la absorción nutrimental y contra diversos factores de estrés abiótico, además, su eficiencia dependerá de otros factores, entre ellos las interacciones entre los cultivos y el medio ambiente.

El fosfito (Phi) un análogo estructural de fosfato (Pi) que es eficientemente absorbido por el sistema de transportadores de Pi en plantas superiores y es rápidamente movilizado por el xilema y el floema. Está emergiendo como un inductor potencial de respuestas metabólicas beneficiosas ya que ha demostrado su efectividad contra diferentes factores

de estrés abiótico y ha mejorado el rendimiento y la calidad de ciertos cultivos. Adicional a sus efectos bioestimuladores, el Phi tiene la capacidad de controlar patógenos como oomicetos, que causan pérdidas económicas considerables en diferentes cultivos.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es determinar el efecto del tratamiento vía radical de Phi en el crecimiento, la absorción nutrimental y las concentraciones de clorofilas y aminoácidos en tres cultivares de caña de azúcar sometidas a diversos factores de estrés abiótico: salinidad, sequía y baja intensidad luminosa.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Fosfito y su aplicación en la agricultura

El fosfito también conocido como fosfonato ( $\text{Phi}$ ;  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ), es una forma reducida y análogo estructural de fosfato ( $\text{Pi}$ ;  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) que es 1000 veces más soluble que el  $\text{Pi}$  en condiciones similares, es cinéticamente estable lo que lo hace menos reactivo y, por tanto, menos propenso a fijarse en el suelo (Sandoval-Vargas *et al.*, 2018), su oxidación es termodinámicamente favorable debido al bajo potencial redox de fosfato/fosfito ( $E^0 \sim -650 \text{ mV}$ ), lo que permite la reducción directa de  $\text{NAD(P)}^+$ , incluso en una proporción muy baja de fosfito/fosfato (Claassens *et al.*, 2018), recientemente se demostró que el  $\text{Phi}$  puede actuar como donante de electrones y fuente de energía para el crecimiento microbiano y carbonización de un compuesto conocido como oxidación disimilatoria de fosfito (Figueroa & Coates, 2017).

Se desconoce la concentración de fosfito e hipofosfito en muchos entornos naturales, pero se han detectado en cantidades micromolares en algunos sistemas acuáticos, donde pueden representar hasta un tercio del total de  $\text{P}$  disuelto (Bisson *et al.*, 2017), existe evidencia de que puede ser producido por procesos naturales como el metabolismo biológico, la reducción geotérmica del  $\text{Pi}$  (Figueroa & Coates, 2017), por corrosión de metales y minerales metálicos a base de hierro y níquel, y por la oxidación concomitante del hierro ferroso, además, de varias fuentes antropogénicas (Pasek, 2019).

du Jardin (2015) clasifica a las sales de fosfito en la categoría de bioestimulante, ya que la respuesta de las plantas tratadas con éste, con frecuencia no puede explicarse como consecuencia de la conocida función anti fúngica de sus moléculas (Thao & Yamakawa, 2009); por tanto, el  $\text{Phi}$  está emergiendo de manera reciente como un novedoso bioestimulante que confiere tolerancia al estrés abiótico (Gómez-Merino & Trejo-Téllez, 2015).

La eficiencia del  $\text{Phi}$  es mayor cuando la dosis y su aplicación se sincronizan adecuadamente para satisfacer las necesidades del cultivo; sin embargo, sigue siendo un reto determinar un método correcto de aplicación, así como su fuente, tasa y la etapa

fenológica adecuados en función a los distintos cultivos agrícolas no biotecnológicos, debido a la alta movilidad del ion a lo largo de toda la planta (Lovatt & Mikkelsen, 2006).

Los efectos positivos de Phi en el metabolismo de las plantas son más evidentes cuando se aplica a las raíces en sistemas hidropónicos o asperjado vía foliar; se considera que tanto el Pi como el Phi son absorbidos por las plantas a través de transportadores de Pi (Giehl & von Wirén, 2014; Gómez-Merino & Trejo-Téllez, 2015) y rápidamente movilizado por el xilema y el floema de las plantas (López-Arredondo & Herrera-Estrella, 2013). El uso de Phi como bioestimulante se potencializa cuando los niveles de Pi están en dosis suficientes (Gómez-Merino & Trejo-Téllez, 2015, 2016).

El Phi es un inductor potencial de respuestas metabólicas beneficiosas en las plantas, ya que ha demostrado su efectividad contra diferentes factores de estrés y ha mejorado el rendimiento y la calidad de los cultivos (Gómez-Merino & Trejo-Téllez, 2015), entendiendo por bioestimulante vegetal a cualquier sustancia o microorganismo que es aplicado a las plantas con el objetivo de mejorar la eficiencia en la absorción y uso de nutrimentos, los rasgos de calidad del cultivo y la tolerancia al estrés abiótico, independientemente del contenido de nutrientes (du Jardín, 2015); Aunque se han realizado importantes progresos en el campo de la absorción, el transporte y la localización subcelular del Phi, aún se carece de una comprensión más profunda de los procesos fundamentales detrás de los efectos de Phi en el metabolismo de las plantas (Gómez-Merino & Trejo-Téllez, 2015), distinto de su acción fungicida.

### **Estrés abiótico en plantas superiores**

Debido a su vida sésil, las plantas están continuamente expuestas a una amplia gama de tensiones ambientales; el concepto de estrés supone la aparición de un factor externo que influye de manera negativa en las condiciones de vida que son óptimas para una planta (Gerszberg & Hnatuszko-Konka, 2017), es una restricción que limita la tasa de fotosíntesis y reduce la habilidad de las plantas para convertir energía en biomasa (Parihar *et al.*, 2015).

El estrés abiótico en su mayoría son señales físicas que impactan de manera simultánea en todas las partes de las células. Como resultado, las señales de estrés abiótico podrían

percibirse independientemente en varios orgánulos de las células y por varias macromoléculas y estructuras celulares (Zhu, 2016).

Los principales tipos de estrés abiótico que afectan a las plantas y cultivos en el campo están siendo ampliamente estudiados, debido a que en condiciones naturales existe la combinación de dos o más tipos (Suzuki *et al.*, 2014).

Entre los factores abióticos que mayormente han contribuido a la evolución de las plantas, el estrés osmótico es considerado el más importante, y se puede manifestar a través de la deshidratación por sequía, por frío o por salinidad, lo que impide que las plantas expresen su máximo potencial genético (Zhu, 2002).

### **Estrés salino y su impacto en la planta**

Se entiende por estrés salino al efecto adverso del exceso de elementos minerales como  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en la planta (Parihar *et al.*, 2015). La salinidad es la palabra que describe a los suelos que contienen altas concentraciones de sales solubles, principalmente  $\text{NaCl}$ , y que resulta hostil a la mayoría de las formas de vida porque es responsable de un desequilibrio de la homeostasis de los iones a nivel celular, que para resolverse requiere un ajuste osmótico a través de la flexibilidad morfológica y la biosíntesis de los metabolitos secundarios (Leitão & Enguita, 2016).

Existen cultivos que muestran un gradiente de tolerancia a la salinidad como resultado de una combinación anatómica, fisiológica y de estrategias moleculares más o menos eficientes para minimizar sus efectos perjudiciales; empero, se conoce que la mayoría de las plantas son susceptibles al estrés salino, y no pueden rendir bien en concentraciones de sal en el suelo superiores a 100 mM  $\text{NaCl}$  (Chiconato *et al.*, 2019). Por tanto, altos niveles de iones en la solución del suelo inducen rápidamente efectos osmóticos, reduciendo la absorción de agua por las raíces (sequía fisiológica) y el creciente exceso de absorción de iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  comienza a producir citotoxicidad y problemas de pH que ocasionan interferencia en el balance nutrimental (Moles *et al.*, 2016).

Como ya se indicó, al aumentar la salinidad se reporta un bloqueo en la absorción de agua por las raíces lo que limita además la absorción de nutrientes, influyendo así en la apertura estomática y, por lo tanto, presentando una disminución en las reacciones bioquímicas, reducción de la actividad fotosintética y la alteración de enzimas implicadas en la síntesis de clorofila, lo que resulta en la pérdida de pigmentos. También la falta de disponibilidad de CO<sub>2</sub> conduce a un mayor cierre estomático debido al consumo reducido de NADPH producido por el ciclo de Calvin, así que se puede concluir que el estrés por salinidad afecta negativamente a diferentes parámetros, es decir, concentración de clorofilas, crecimiento, acumulación de biomasa, estatus hídrico y absorción nutrimental (Hameed *et al.*, 2014; Leitão & Enguita, 2016).

La acumulación de Na<sup>+</sup> se ejecuta en función a los transportadores de membrana, responsables de la captación, exportación y compartimentación de Na<sup>+</sup>. Gracias a investigaciones realizadas en plantas modelo como *Arabidopsis* y otros cultivos, se han revelado las identidades moleculares de algunos genes hipersensibles a la sal (Salt Overly Sensitive; SOS1, SOS2, SOS3), donde la fosforilación de SOS2 a SOS1 potencializa la actividad antiportadora de Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> de SOS1 y como resultado la concentración intracelular de Na<sup>+</sup> se reduce por el transporte de salida de Na<sup>+</sup> a través de SOS1 (Gong *et al.*, 2020).

### **Estrés por déficit hídrico**

Se pronostica que la escasez de agua, junto con la incidencia de altas temperaturas, aumentará en el futuro cercano en muchas regiones del mundo. Aunque la fertilización por el aumento del CO<sub>2</sub> puede compensar en parte los efectos de estos cambios en el crecimiento y desarrollo de las plantas, se prevé que se produzca un efecto perjudicial en la producción de alimentos y piensos en muchas de las principales regiones agrícolas (Chaves & Davies, 2010), debido a que simultáneamente se afecta un número variado de rasgos morfológicos y fisiológicos en las plantas (Silva *et al.*, 2008).

La caña de azúcar se cultiva comúnmente en áreas planas y en climas cálidos, por lo que, no se pueden evitar anualmente las temporadas de sequía, condición ambiental subóptima o limitante durante el periodo de crecimiento, que causa reducción drástica

en el rendimiento, ya que decrece el número de tallos triturables, afecta negativamente el contenido de sacarosa, el amacollamiento y la altura del tallo (Khalil *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2008). Además, mientras la temperatura de la hoja aumenta, se presentan descensos significativos en la conductancia estomática, transpiración, y fotosíntesis (Castañeda-Castro *et al.*, 2015). Asimismo, el diámetro del tallo es dependiente del régimen de agua, sin embargo, también puede ser afectado por el genotipo (Silva *et al.*, 2008).

Por otra parte, detectar la disponibilidad de agua en el suelo e iniciar respuestas apropiadas al estrés son importantes para que las plantas sobrevivan a la sequía. La matriz del suelo es heterogénea en cuanto a disponibilidad de agua y las raíces pueden detectar gradientes de potencial hídrico en el suelo y crecer hacia áreas con alto potencial hídrico, un proceso denominado hidrotropismo, existen otras moléculas mensajeras de larga distancia para desencadenar respuesta de estrés en parte aérea como es el ácido abscísico (ABA),  $H^+$ (pH),  $Ca^{2+}$ , ROS, NO,  $SO_4^{2-}$ , lípidos, péptidos pequeños, ARN, señales físicas (hidráulicas y eléctricas) (Gong *et al.*, 2020).

En estrés por sequía, las concentraciones de ABA en los tejidos vegetales pueden aumentar hasta 50 veces, siendo uno de los cambios más drásticos observados hasta ahora en la concentración de una hormona vegetal en respuesta a un estímulo ambiental. No es de sorprender que las funciones y las vías de señalización de ABA en las respuestas de las plantas a diversos estreses se hayan estudiado ampliamente, y ahora se acepta que el ABA desempeña un papel importante en la adaptación de las plantas a los estreses ambientales, como la sequía, el frío o la alta salinidad. (Zhu, 2016). Además, ABA también regula muchos procesos de desarrollo a lo largo del ciclo de vida de la planta, incluida la maduración y latencia de la semilla, la germinación de la semilla, el desarrollo vegetativo, el desarrollo de nódulos y la senescencia (Gong *et al.*, 2020).

### **Estrés por baja intensidad luminosa**

La luz del sol representa la fuente de energía para la fotosíntesis, factor clave que regula el crecimiento, además, de la función y estructura del aparato fotosintético de las plantas,

por lo cual, existen plantas que necesitan alta irradiancia y otras, que demandan sombreado intenso para crecer y completar su ciclo de vida (Mathur *et al.*, 2018).

Si bien la caña de azúcar es una especie C<sub>4</sub>, clasificada como subtipo enzima málica dependiente de NADP (NADP-ME), el análisis de la expresión génica sugiere que la descarboxilación a través de la enzima fosfoenolpiruvato carboxinasa (PEPCK) predominaría sobre NADP-ME en las hojas maduras, y desde un punto de vista ecológico, la descarboxilación de plantas C<sub>4</sub> por más de una enzima podría conferir ventajas al mantener una alta eficiencia fotosintética en una variedad de condiciones ambientales, además las especies C<sub>4</sub> presentan plasticidad metabólica, es decir, la capacidad de aclimatarse a los cambios ambientales mediante ajustes en los rasgos morfológicos y fisiológicos (Sales *et al.*, 2018).

Las plantas para lograr su máxima robustez se modulan a sí mismas de acuerdo con las condiciones de luz fluctuantes, en condiciones de sombra, necesitan absorber suficiente luz ya que la producción de ATP es insuficiente para la fijación de carbono y la biosíntesis de carbohidratos, situación que se revierte cuando existe un exceso de luz, por lo que, han desarrollado una variedad de características que optimizan la intercepción, absorción y procesamiento de la luz (Mathur *et al.*, 2018).

Las plantas de caña de azúcar tienen flexibilidad entre las vías de descarboxilación, lo que podría equilibrar los flujos energéticos y metabólicos entre el mesófilo y las células del haz de la vaina y mejorar la aclimatación de las plantas a la baja disponibilidad de luz. A medida que aumenta la fuga en las plantas bajo sombra y se reduce la eficiencia fotosintética, es probable que se produzca un aumento en la contribución de la vía PEPCK en el proceso de descarboxilación para compensar los costos energéticos de la reposición de CO<sub>2</sub> (Sales *et al.*, 2018).

### **Estrés y metabolismo**

La sequía y los suelos salinos son condiciones ambientales adversas que las plantas enfrentan de manera constante (Gong *et al.*, 2020). Mejorar la resistencia de las plantas al estrés abiótico es fundamental para la productividad agrícola y también para la sostenibilidad ambiental debido a que los cultivos con poca resistencia al estrés



consumen demasiada agua y fertilizantes y, por lo tanto, son una gran carga para el ambiente (Zhu, 2016).

Las plantas muestran cambios específicos en la expresión génica, el metabolismo y la fisiología en respuesta a diferentes condiciones ambientales de estrés (Gong *et al.*, 2020).

Las especies reactivas de oxígeno (ROS), que también se denominan "oxidantes" o "especies derivadas de oxígeno" (Kapoor *et al.*, 2019), son metabolitos cuidadosamente regulados capaces de señalar y comunicar información clave a la maquinaria genética de la célula. Son especies químicas intracelulares que contienen oxígeno ( $O_2$ ) y son reactivas frente a lípidos, proteínas y ADN, incluyen al anión superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) especies poco reactivas, así como radicales hidroxilo ( $OH\bullet$ ) especie muy reactiva ya que reacciona muy cerca de su sitio de generación (Glasauer & Chandel, 2013; Hasanuzzaman *et al.*, 2021; Kapoor *et al.*, 2019). Normalmente están presentes en todas las células aeróbicas en equilibrio con los antioxidantes bioquímicos (Scandalios, 2002).

El estrés oxidativo ocurre cuando este equilibrio crítico se interrumpe debido a un exceso de ROS, agotamiento de antioxidantes o ambos (Scandalios, 2002), y aunque las ROS se sintetizan en la mayoría de los compartimentos celulares, incluido el cloroplasto, mitocondrias, peroxisomas, membrana plasmática, apoplasto, pared celular y retículo endoplásmico, los principales sitios de generación de ROS son los cloroplastos, los peroxisomas y el sistema de transporte de electrones respiratorio mitocondrial (Hasanuzzaman *et al.*, 2021), lo que podría afectar varias macromoléculas intracelulares, estas ROS con altas tasas de oxidación causan daños en los tejidos de las plantas, mutación del ADN, desorden en los orgánulos celulares como son pared y membrana celular, citoplasma, cloroplasto, mitocondria, retículo endoplasmático, peroxisomas y núcleo, además, descomposición de los lípidos, las proteínas y el aparato fotosintético (Mohammadi *et al.*, 2021).

Para contrarrestar los efectos oxidantes y restablecer el equilibrio redox, las células deben restablecer importantes parámetros homeostáticos. Los cambios asociados con

el daño oxidativo y con la restauración de la homeostasis conducen con frecuencia a la activación o silenciamiento de genes que codifican factores de transcripción reguladores, enzimas de defensa antioxidantes y proteínas estructurales. Las ROS no siempre son subproductos metabólicos dañinos; cuando están estrictamente reguladas, las ROS realizan funciones cruciales en la célula (Castro *et al.*, 2021; Scandalios, 2002), ayudan a la regulación de la homeostasis a nivel celular en los tejidos sanos, contribuyen significativamente como segundos mensajeros y controlan la actividad celular mediante la modulación de las vías de señalización (Kapoor *et al.*, 2019).

Un oxidante se define como una molécula que contiene uno o más electrones desapareados y actúa como agente oxidante durante la reacción redox. Activa la producción de radicales libres mediante la transferencia de un electrón en una reacción química. Las células utilizan el oxígeno para generar energía y radicales libres, que son el resultado de la producción de ATP por parte de las mitocondrias. Al ser parte de la reacción en cadena propagativa, los radicales libres se combinan con otros radicales y se deterioran más, hasta que los antioxidantes, que son sustancias que rompen la cadena y no son tóxicos por naturaleza, son superados (Kapoor *et al.*, 2019).

Todos los organismos poseen defensas celulares intrínsecas para combatir el estrés oxidativo; esas sustancias se denominan antioxidantes. Los radicales libres tienen una vida útil corta, como en mili, micro o nanosegundos, y reaccionan voluntariamente con lípidos, ADN, proteínas, etc. Causan daño y forman productos nocivos como peróxidos y otros aductos de lípidos. El daño resultante en las proteínas provoca una reducción de las actividades enzimáticas, mientras que el ADN provoca mutagénesis y carcinogénesis (Kapoor *et al.*, 2019).

El sistema de respuesta oxidativa de la planta, que incluye producciones enzimáticas y no enzimáticas, interfiere con un proceso aeróbico para neutralizar la escisión oxidativa debido a la producción de ROS. Las enzimas protectoras incluyen catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), guaiacol peroxidasa (GPX), superóxido dismutasa (SOD), polifenol oxidasa (PPO) y monodehidroascorbato reductasa (MDHAR), dehidroascorbato reductasa (DHAR), tiorredoxina (TRX), mientras que glutatión peroxidasa (GSH-PX), ácido ascórbico (AsA), prolina (Pro), carotenoides (Car), compuestos fenólicos,

flavonoides, alcaloides, aminoácidos no proteicos,  $\alpha$ -tocoferol y poliaminas (PAs) tienen funciones de protección no enzimática (Gong *et al.*, 2020; Kapoor *et al.*, 2019; Machinandiarena *et al.*, 2018; Mohammadi *et al.*, 2021).

### **Historia de la caña de azúcar**

Los hallazgos de Lloyd-Evans & Joshi (2017, 2020) proponen a la India como centro de origen de la caña de azúcar y de la industria azucarera, que data del año 2500 a. C. De la India se distribuyó a Persia, luego a África Oriental, Europa y finalmente a América.

La introducción de la caña de azúcar a través del Atlántico al Nuevo Mundo se realizó de manera similar a la de otros productos agrícolas cultivados normalmente en el Viejo Continente, mediante incursiones, la primera la efectuó la Corona española durante el segundo viaje de Cristóbal Colón desde las Islas Canarias a la Isla Hispaniola en el Caribe (República Dominicana) en 1493; sin embargo, las plantaciones no lograron tener éxito durante ese año y los años intermedios. La segunda incursión fue hecha por los portugueses desde Madeira a Brasil y aunque no se conoce una fecha de introducción, se sabe que para el año de 1526 la aduana de Lisboa cobraba derechos sobre la caña procedente de Brasil (Irvine, 1999; Lloyd-Evans & Joshi, 2020).

Suele citarse el año de 1501 y el nombre de Pedro de Atienza como el responsable de la siembra del primer cañaveral con esquejes importados de las Islas Canarias (Baños-Llanos, 2015; Fernández-Delgado, 2019), cerca del año 1516 en La Española, se comenzó a moler en el primer ingenio de caña de azúcar en el Nuevo Mundo (Lloyd-Evans & Joshi, 2020). En 1521, los colonos españoles de Hernán Cortés introdujeron a México las primeras plantas de caña de azúcar (cv. Castilla) y para el año de 1536 se estableció en San Andrés Tuxtla, Veracruz, el primer ingenio azucarero (Aguilar-Rivera *et al.*, 2012); sin embargo, fue hasta inicios del siglo XX durante el Porfiriato cuando propiamente se comenzaron a establecer los sistemas de “ingenios”, que consistían en fábricas y campos bajo el modelo de “plantación” (Figueroa Rodríguez *et al.*, 2015).

El nombre de *Saccharum* atribuido a la caña de azúcar tiene su origen de la palabra sánscrita Karkara o Carkara, que significa grava, posteriormente se escribió Sakkara en el idioma prácrito de la antigua India significado de “azúcar granular” en el año 500 a. C.

Los árabes al introducir la caña de azúcar de India al Medio Oriente a través de Persia la llamaron Sakkar o Sukkar. Siglos más tarde, cuando los griegos la trasladaron desde Asia Menor a Europa se conoció como Sakchar o Sakcharon, después, los romanos la nombrarían *Saccharum*, nombre adoptado y atribuido a Linneo en 1753 para su clasificación botánica que perdura hasta nuestros días (Bakker, 1999; Lloyd-Evans & Joshi, 2020; Rosenfeld, 1956). En el **Cuadro 1** se presenta la clasificación taxonómica de la caña de azúcar.

**Cuadro 1.** Clasificación taxonómica de la caña de azúcar.

Super - Reino	Eucariota
Reino	Plantae
División	Tracheophyta
Sub-División	Spermatophytina
Clase	Magnoliopsida
Sub-Clase	Liliidae
Superorden	Lilianaes
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Sub-Familia	Panicoideae
Tribu	Andropogoneae
Sub-Tribus	Saccharinae
Género	<i>Saccharum</i> L.
Especie	<i>Saccharum</i> spp.
Variedades	Black Cheribon, Criolla, Cristalina, Black Fiji, etc.
Cultivares	Todos los comercialmente cultivados (CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431, COLPOSCTMex 05-204)

Adaptado de Integrated Taxonomic Information System (ITIS) Database (<https://www.itis.gov>).

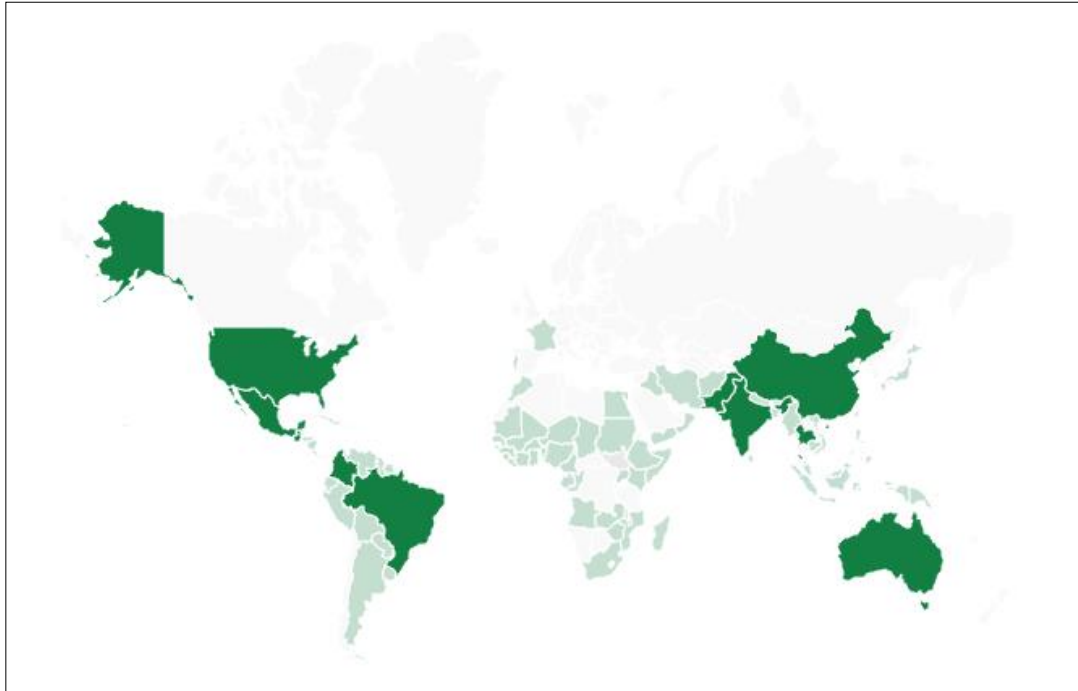
Los cultivares modernos de caña de azúcar son híbridos complejos entre seis miembros del género *Saccharum*: *S. officinarum*, *S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. barberi* y *S. sinence* (Artschwager & Brandes, 1958; Grivet *et al.*, 2004).

Dicha taxonomía no fue cuestionada durante más de 50 años, sin embargo, hallazgos recientes indican que el género *Saccharum* consta de solo cuatro especies verdaderas y reclasifica como subespecie a las otras tres: *S. spontaneum* L., *S. robustum*, *S. officinarum* subsp. *sinense* y *S. cultum* subsp. *edule* y subsp. *barberi* (Lloyd-Evans, *et al.*, 2019a; Lloyd-Evans, *et al.*, 2019b).

Antes de la década de 1780, todas las cañas de azúcar surgieron de híbridos silvestres esencialmente estériles de *S. officinarum* con centro de diversidad en Nueva Guinea y *S. spontaneum* con distribución desde el norte de África hasta Nueva Guinea. Durante la década de 1800, los nuevos bastones con alto contenido de sacarosa descubiertos en la Polinesia suplantaron a los bastones híbridos originales. Sin embargo, aunque productivas y fértiles, estas variedades de caña eran susceptibles a enfermedades y, a partir de la década de 1920, fueron reemplazadas por cultivares híbridos modernos (complejos de *S. cultum*, *S. officinarum* L. y *S. spontaneum* L.) (Lloyd-Evans & Joshi, 2016).

### **Caña de azúcar en México**

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo ampliamente distribuido en el mundo, actualmente, se produce en más de 100 países y se cultiva en una extensa gama de condiciones agroclimáticas (**Figura 1**), favoreciéndose su desarrollo en las regiones tropicales y subtropicales con climas cálidos y húmedos, suelos bien drenados con pH 7.5 a 8.5 y alto contenido de materia orgánica (Elsheery *et al.*, 2020).



**Figura 1.** Países responsables del 80% de la producción mundial de caña de azúcar, 2016-2018. Fuente: FAOSTAT, 2020; Elaboración propia.

En 2018, la superficie mundial cosechada fue de 1 381 millones de hectáreas, de las cuales el 2.26% concierne a cultivos azucareros, siendo, el 84.20% producto de la caña de azúcar.

En el **Cuadro 2** se presenta la lista de países que aportan más del 80% del volumen de producción mundial de caña de azúcar, donde, Brasil se sitúa en el primer lugar con 40%, seguido de India y China; México, por su volumen de producción, ocupa el sexto lugar (FAOSTAT, 2020).

También se observa una baja eficiencia en rendimiento en los primeros seis países, debido a que su producción aumenta al incrementar el área cosechada.

Es importante mencionar que Guatemala, Colombia, Estados Unidos y Australia poseen una mayor eficiencia en la producción del cultivo de caña de azúcar; incluso, la tasa de crecimiento media anual (TCMA), para rendimiento se incrementó en países como Guatemala y EUA (**Cuadro 3**).

**Cuadro 2.** Producción, área cosechada y rendimiento de los principales países productores de caña de azúcar, 2016-2018.

País	Producción (Millones de Mg)		Área cosechada (x1000 ha)		Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )
Brasil	758.02		10151.8		74.67
India	343.81		4689.7		73.31
China, Continental	105.24		1392.9		75.55
Tailandia	98.82		1355.7		72.89
Pakistán	75.33		1220.4		61.72
México	56.75		779.7		72.79
Colombia	35.29		404.1		87.34
Australia	34.82		447.9		77.75
Guatemala	31.68		270.7		117.05
Estados Unidos	30.21		365.1		82.73
Otros países	307.69		5254.1		
Total, mundial	1877.66		26332.0		56.70

País	Producción		Área cosechada		Rendimiento
	%	Posición	%	Posición	Posición
Brasil	40.37	1	38.6	1	26
India	18.31	2	17.8	2	29
China, Continental	5.60	3	5.3	3	24
Tailandia	5.26	4	5.1	4	30
Pakistán	4.01	5	4.6	5	49
México	3.02	6	3.0	6	31
Colombia	1.88	7	1.5	12	13
Australia	1.85	8	1.7	8	22
Guatemala	1.69	9	1.0	14	2
Estados Unidos	1.61	10	1.4	13	16
Otros países	16.39		20.0		
Total, mundial	100		100		

Fuente: FAOSTAT, 2020.

Por otra parte, se observa que la TCMA para rendimiento en México fue de 0.11%, lo que ayuda a explicar lo observado en el **Cuadro 2**, donde la producción está en función del área cosechada (Sentíes-Herrera *et al.*, 2016), también, se debe tomar en cuenta que la producción de caña en México es un proceso complejo que consta de subprocesos interdependientes, tradicionalmente la caña de azúcar posee un ciclo promedio de 7 años con 13% de plantilla (caña de 1 año), 15% de soca (caña de 2 años) y 72% de resoca (caña de más de 2 años) situación que afecta su rentabilidad en comparación con otros países (Aguilar-Rivera *et al.*, 2012).

**Cuadro 3.** Tasa de crecimiento media anual, mundial (TCMA, 2010-2018).

País	Producción	Área cosechada	Rendimiento
Brasil	0.45	1.13	-0.68
India	2.86	1.40	1.45
China, Continental	-0.27	-2.00	1.76
Tailandia	4.74	3.47	1.23
Pakistán	3.48	1.75	1.70
México	1.34	1.23	0.11
Colombia	1.22	1.44	-0.56
Australia	0.78	2.35	-0.65
Guatemala	5.32	-0.52	2.47
Estados Unidos	2.62	1.79	2.34

Fuente: FAOSTAT, 2020.

En México, el cultivo de la caña de azúcar en términos de generación de valor, se constituye como el segundo más importante del país, solo después de la cadena de valor del maíz. Durante los años 2015-2017, la población en México fue de aproximadamente 123 millones de habitantes, misma, que utilizó alrededor 5.9 millones de Mg de azúcar por año (48.34 kg de consumo *per cápita* en forma de azúcar y dulcificantes). La producción de este cultivo se concentra en siete regiones cañeras distribuidas en 16 entidades federativas (**Figura 2**), conformadas por Campeche, Chiapas, Colima, Estado de México, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz, donde el área cosechada es de alrededor de 780 mil hectáreas, con una TCMA de 1.23% (**Cuadros 2 y 3**).

Según los datos obtenidos del SIAP (2020), en los años 2016-2019, México obtuvo una producción aproximada de 57 000 000 Mg de caña de azúcar, donde, el área cosechada con riego fue 28% menor respecto al área cosechada de temporal y aun así, aportó casi el 50% de la producción nacional (**Cuadros 4 y 5**).





**Figura 2.** Estados productores de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México. Fuente: SIAP, 2020; Elaboración propia.

En México, el mejoramiento genético de caña de azúcar se realiza en la estación de Hibridación en Rosario Izapa, Chiapas, a través del uso de semilla sexual. Los trabajos de hibridación en los últimos 60 años, han permitido la liberación de más de 150 cultivares mexicanos, que ocupan un 55% de la superficie sembrada del país, el 45% restante, se encuentra sembrado con cultivares extranjeros. Gracias al Programa de Intercambio e Importación de Variedades que mantiene la Cámara Nacional de la Industria Alcohólica y Azucarera (CNIAA) dentro de las instalaciones del CIDCA (Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar A. C.) donde también se cuenta con un banco de germoplasma compuesto por 3184 cultivares; de los cuales, 1133 son mexicanos y 2051 extranjeros (SAGARPA & CONADESUCA, 2017; Sentíes-Herrera *et al.*, 2016).

**Cuadro 4.** Área sembrada, área cosechada, producción y rendimiento medio de las principales entidades federativas productoras de caña de azúcar en México, modalidad temporal, 2016-2019.

Entidad	Área sembrada x1000 ha	Área cosechada x1000 ha	Producción Millones de Mg	Rendimiento Mg ha <sup>-1</sup>
Veracruz	215.26	206.07	13.52	65.61
Oaxaca	58.57	54.48	3.27	60.09
San Luis Potosí	70.15	52.21	2.55	48.96
Tabasco	41.79	38.63	2.31	59.71
Nayarit	23.37	21.73	1.63	74.93
Quintana Roo	28.19	27.82	1.42	51.04
Otros estados	62.25	57.80	3.94	
Total	499.57	458.74	28.64	62.43

Fuente: SIAP, 2020.

**Cuadro 5.** Área sembrada, área cosechada, producción y rendimiento medio de las principales entidades federativas productoras de caña de azúcar en México, modalidad riego, 2016-2019.

Entidad	Área sembrada x1000 ha	Área cosechada x1000 ha	Producción Millones de Mg	Rendimiento medio Mg ha <sup>-1</sup>
Veracruz	86.63	84.69	7.51	88.68
Jalisco	80.15	78.23	7.18	91.80
Morelos	21.55	18.59	2.13	114.93
Tamaulipas	43.25	31.34	2.05	65.55
San Luis Potosí	31.03	24.27	1.89	78.32
Puebla	16.17	15.18	1.76	116.14
Chiapas	18.27	18.27	1.74	95.17
Otros estados	50.56	47.12	4.27	
Total	347.60	317.69	28.53	89.80

Fuente: SIAP, 2020.

A pesar de disponer de una amplia gama de cultivares comerciales, desde el año 2010, aproximadamente el 70% de la superficie sembrada en el país se sustenta esencialmente de tres cultivares: CP 72-2086, Mex 69-290 y Mex 79-431 (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014; Aguilar-Rivera *et al.*, 2018; Cervantes-Preciado *et al.*, 2019), como se presenta en el **Cuadro 6.**

**Cuadro 6.** Cultivares nacionales y extranjeros imperantes en México respecto a la superficie cultivada.

<b>Cultivar</b>	<b>Progenitores</b>	<b>Origen</b>	<b>Superficie (ha)</b>
CP 72-2086	CP 62-374xCP 63-588	Canal Point (USDA), Florida; Estados Unidos.	238 138.03
Mex 69-290	Mex 56-476xMex 53-142	CIDCA, Chiapas; México.	158 851.71
Mex 79-431	Co 421xMex 57-473	CIDCA, Chiapas; México.	39 542.50
ITV 92-1424	Espontáneo	Ingenio Tres Valles , Veracruz; México.	21 516.39
RD 75-11	CB 38-22xCP 57-603	República Dominicana.	30 626.47
My 55-14	CP 34-79 x B 45181	Mayarí; Cuba.	8 488.82

Fuente: (SAGARPA & CONADESUCA, 2017), Zafra: 2014-2015.

La capacidad productiva de la caña de azúcar está en función de las características agroclimáticas de las distintas zonas cañeras del país, de manera breve, se observa que en regiones con modalidad de temporal se logró un rendimiento medio de 62 Mg ha<sup>-1</sup> mientras que en regiones con modalidad de riego se alcanzó un rendimiento medio de casi 90 Mg ha<sup>-1</sup> (**Cuadros 4 y 5**), información que coincide con el rendimiento potencial de caña de azúcar al considerar las correcciones en dosis de fertilización, en función de las propiedades físicas y químicas de los suelos (Aguilar-Rivera *et al.*, 2018).

Debido a que en el país algunos cultivares poseen más de 25 años de uso comercial, se cree presentan una degradación genética natural, ya que sus rendimientos son muy variables en una misma zona, presentan mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades comunes (Cervantes-Preciado *et al.*, 2019). En este contexto, la biotecnología, a través del cultivo *in vitro*, ha mostrado sus beneficios al posibilitar la producción de plantas con pureza genética y calidad fitosanitaria que aseguran mayor amacollamiento (Castañeda-Castro *et al.*, 2014) y altos rendimientos en la biomasa de tallo una vez que se han establecido en campo (Miranda-Marini *et al.*, 2018).

Las especies C<sub>4</sub> presentan plasticidad metabólica, es decir, la capacidad de aclimatarse a los cambios ambientales mediante ajustes en los rasgos morfológicos y fisiológicos (Sales *et al.*, 2018). Waclawovsky *et al.* (2010) señalan que la caña de azúcar puede

alcanzar un rendimiento máximo experimental de hasta 200 Mg ha<sup>-1</sup> y un máximo teórico de 400 Mg ha<sup>-1</sup>.

La caña de azúcar se usa principalmente para producir etanol y azúcar; sin embargo, tiene una importante actividad económica asociada con la producción de otros productos, incluidos el ron, la alimentación animal y la melaza (Begcy *et al.*, 2012); además, aporta beneficios a la salud, ya que es rica en componentes activos como son triterpenos, flavonoides, fenoles, fitoesteroles (Feng *et al.*, 2014) y diferentes glucósidos (Singh *et al.*, 2015). Debido a sus actividades antioxidantes y antihiperoglucémicas, algunos pacientes diabéticos utilizan la fracción fenólica de la melaza en alimentos funcionales (Ali *et al.*, 2019; Deseo *et al.*, 2020).

### **Metabolismo caña de azúcar**

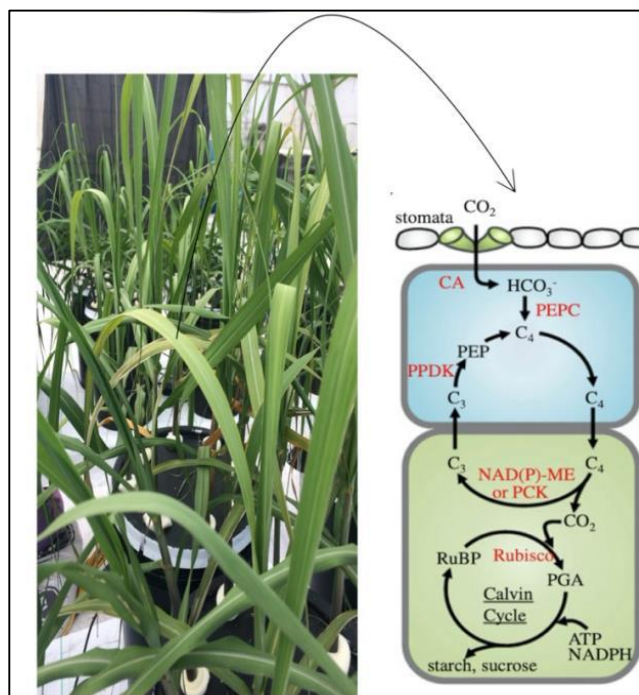
La planta de caña de azúcar (*Saccharum* sp.) pertenece a la familia *Poaceae* y es miembro de la tribu *Andropogoneae* (**Cuadro 1**) junto con plantas como el maíz y el sorgo, es un pasto perenne que se desarrolla en regiones tropicales y subtropicales para la producción de azúcar y biocombustible, aunque en los últimos años se revela su uso como fuente alternativa de energía renovable.

Como planta C<sub>4</sub>, la caña de azúcar es uno de los cultivos más eficientes para convertir energía solar en energía química, debido a que poseen un mecanismo eficiente de concentración de CO<sub>2</sub>, que aumenta de 10 a 100 veces en los sitios catalíticos de Rubisco en la célula de la vaina en comparación con el aire del ambiente (Yamori *et al.*, 2013).

Entre las plantas C<sub>4</sub>, hay tres subtipos, basados en la enzima de descarboxilación del ácido C<sub>4</sub>: subtipo enzima málica dependiente de NADP (NADP-ME), subtipo enzima málica dependiente de NAD (NAD-ME) y subtipo fosfoenolpiruvato carboxinasa (PEPCK). El malato (o aspartato) se transporta a las células de la vaina del haz vascular y finalmente se descarboxila, produciendo CO<sub>2</sub> y piruvato. Luego, el CO<sub>2</sub> es fijado por la Rubisco en los cloroplastos de las células de la vaina del haz, que tienen un ciclo de Calvin normal, como en las plantas C<sub>3</sub> (Yamori *et al.*, 2013).

En el metabolismo C<sub>4</sub> el CO<sub>2</sub> es hidratado a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> por la enzima anhidrasa carbónica, el cual se incorpora a fosfoenolpiruvato (PEP) con lo que se forma oxaloacetato (OAA) mediante la actividad de la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPC) ubicada en el citosol. El PEP se produce a partir de piruvato y ATP, en la reacción catalizada por la enzima piruvato fosfato dicinasa (PPDK) ubicada en el cloroplasto (**Figura 3**). El OAA se reduce a malato o, alternativamente, se transamina a aspartato en una reacción con alanina. Si se forma malato, aspartato o una mezcla de los dos, depende del subtipo de la especie C<sub>4</sub>.

La partición de carbono es un proceso crítico en la distribución de la energía química convertida por la planta a través de la fotosíntesis. En general, la fotosíntesis y la asimilación de carbono ocurren en los cloroplastos de las células del mesófilo de la hoja y, además, en las células del haz de la vaina en las plantas C<sub>4</sub> (**Figura 3**). El carbono fijado durante la fotosíntesis se convierte en azúcar o derivados de azúcar en las células fuente “fotosintéticas” y posteriormente se distribuye a las células receptoras distales. Luego vía floema, los azúcares son importados en tejidos sumideros y emprenden dos destinos diferentes: consumo y almacenamiento. Por lo general, alrededor del 35-40% de los azúcares son consumidos por las células vivas para proporcionar energía para el crecimiento celular, incluida la expansión, la división, la diferenciación, la absorción de nutrientes y el mantenimiento durante el desarrollo de la planta. Una parte está presente en las células como intermediarios metabólicos, como azúcares simples, aminoácidos, ácidos orgánicos, etc. El azúcar restante puede almacenarse como tal en vacuolas o fijarse en polímeros que pueden ser removilizados como el almidón en los plástidos o agregarse a biomasa estructural (como celulosa, hemicelulosas y lignina) (J. Wang *et al.*, 2013).



**Figura 3.** Fijación de carbono en células del mesófilo y del haz de la vaina en plantas con metabolismo fotosintético C<sub>4</sub> como lo es la caña de azúcar. Adaptado de Yamori *et al.* 2013.

En la actualidad, debido a la creciente población mundial, el sector agrícola enfrenta el reto de aumentar la eficiencia en la producción y el uso de los recursos, así como disminuir el impacto ambiental en los ecosistemas y la salud humana. La correcta implementación de insumos agrícolas, como los fertilizantes y los pesticidas, desempeñan un papel importante. Una innovación prometedora y respetuosa con el ambiente que surge a finales del siglo pasado y debe ser considerada para garantizar la productividad continua de los cultivos, es la bioestimulación vegetal. De las evidencias anteriores, en el presente trabajo de investigación se realizó la evaluación del efecto del suministro radical de fosfito ( $\text{Phi}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) como bioestimulante en el crecimiento, la absorción nutrimental, fotosíntesis, concentración de clorofilas y aminoácidos en plantas de caña de azúcar sometidas a factores de estrés abiótico.

# FOSFITO, ESTRÉS SALINO Y POTENCIAL OSMÓTICO EN CAÑA DE AZÚCAR

## 1.1 RESUMEN

La sequía y la salinidad se consideran como las tensiones abióticas que más limitan la productividad. Los bioestimulantes, sustancias naturales y respetuosas con el ambiente estimulan el desarrollo de la planta y contrarrestan el estrés abiótico. La eficiencia del Phi como bioestimulante es mayor cuando la dosis y su aplicación se sincronizan adecuadamente para satisfacer las necesidades del cultivo. Motivo por el que, en la presente investigación se estudio el efecto de Phi en situación de estrés abiótico en crecimiento, absorción nutrimental, contenido de pigmentos fotosintéticos y aminoácidos libres totales en raíz, tallo y hoja de tres cultivares de caña de azúcar (CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204) como planta modelo. Se observa que, en ausencia de estrés, la adición de Phi tiene efectos negativos al reducir en un 37.5 y 55.1% la concentración de S y Mn en hoja y 48.2% la concentración de Mn en tallo cv. CP 72-2086. Por el contrario, bajo estrés salino, la adición de Phi incrementó en un 64.9, 34.2 y 34.8% la biomasa fresca, clorofila *a* y clorofila total en hojas cv. CP 72-2086, en un 43 y 32% la concentración de clorofila *a* y clorofila total en hojas cv. MotzMex 92-207, además, redujo en un 58 y 32%, y en un 50 y 28.8% la concentración de Na en hoja y tallo de los cv. CP 72-2086 y MotzMex 92-207. Se posee evidencia suficiente para concluir que el aporte de Phi ( $0.0375 \text{ mol}_e \text{ m}^{-3}$ ) vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 25%, incrementó la concentración pigmentos fotosintéticos en hojas de tres cultivares de caña de azúcar, además, el cv. MotzMex 92-207, fue la planta de caña de azúcar que mejor respuesta tuvo a la adición de Phi como bioestimulante en condiciones de estrés abiótico.

**Palabras clave:** Fosfito, bioestimulante, estrés abiótico, salinidad, déficit hídrico, caña de azúcar, CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204.

# PHOSPHITE, SALINE STRESS AND OSMOTIC POTENTIAL IN SUGAR CANE

## 1.2 ABSTRACT

Drought and salinity are considered the abiotic stresses that most limit productivity. Biostimulants, natural substances that respect the environment, stimulate the development of the plant and counteract abiotic stress. The efficiency of Phi as a biostimulant is greater when the dose and its application are properly synchronized to meet the needs of the crop. Reason why, in the present investigation, was studied the effect of Phi in a situation of abiotic stress on growth, nutritional absorption, content of photosynthetic pigments and total free amino acids in root, stem and leaf of three sugarcane cultivars (CP 72-2086, MotzMex 92-207 and COLPOS CTMex 05-204) as a model plant. It is observed that, in the absence of stress, the addition of Phi has negative effects by reducing the concentration of S and Mn in leaves by 37.5 and 55.1% and the concentration of Mn in stem cv. by 48.2%. CP 72-2086. On the contrary, under salt stress, the addition of Phi increased by 64.9, 34.2 and 34.8% the fresh biomass, chlorophyll *a* and total chlorophyll in leaves cv. CP 72-2086, in 43 and 32% the concentration of chlorophyll *a* and total chlorophyll in leaves cv. MotzMex 92-207, in addition, reduced by 58 and 32%, and by 50 and 28.8%, the concentration of Na in leaves and stems of cv. CP 72-2086 and MotzMex 92-207. There is sufficient evidence to conclude that the contribution of Phi ( $0.0375 \text{ mol c m}^{-3}$ ) via root in the Steiner's 25% nutrient solution increased the concentration of photosynthetic pigments in leaves of three sugarcane cultivars, in addition, cv. MotzMex 92-207 was the sugarcane plant that had the best response to the addition of Phi as a biostimulant under abiotic stress conditions.

**Key words:** Phosphite, biostimulant, abiotic stress, salinity, water deficit, sugarcane, CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204.



### **1.3 OBJETIVO**

Evaluar el efecto del suministro de fosfito ( $\text{Phi}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) vía raíz, en el crecimiento, la absorción nutrimental, fotosíntesis, concentraciones de clorofilas y aminoácidos en plantas de caña de azúcar sometidas a estrés osmótico inducido por salinidad y sequía artificial (reducción del potencial osmótico).

### **1.4 HIPÓTESIS**

El tratamiento con  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$  adicionado a la solución nutritiva, en plantas de caña de azúcar sometidas a estrés osmótico por salinidad y déficit hídrico, reduce el efecto negativo de éste en crecimiento, absorción nutrimental, fotosíntesis y concentraciones de clorofilas y aminoácidos.

### **1.5 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **1.5.1. Localización área experimental**

La fase experimental de este estudio se realizó en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica, ubicado en el Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, durante los meses de julio a octubre de 2019, registrando una temperatura media de 21.84 °C, con una humedad relativa promedio de 55.63% y un punto de rocío de 10.23 °C.

#### **1.5.2. Material vegetal**

El material vegetal consistió en tres cultivares de vitroplantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) obtenidas en biorreactores de inmersión temporal: cv. CP 72-2086 presenta un ciclo maduración temprana con un rendimiento medio de 47 t ha<sup>-1</sup> y constituye el 36% de la superficie sembrada en México, el cv. MotzMex 92-207 tiene un ciclo de maduración media con un rendimiento de 95 Mg ha<sup>-1</sup> y el cv. COLPOS CTMex 05-204 presenta un ciclo de maduración temprana con un rendimiento medio de 130 t ha<sup>-1</sup> (Sentíes-Herrera & Gómez-Merino, 2014; Gómez-Merino & Sentíes-Herrera, 2015; Martínez-Estrada, 2017; Sentíes-Herrera *et al.*, 2019).

### 1.5.3. Manejo del experimento

Las vitroplantas se aclimataron durante un periodo aproximado de dos meses y medio en charolas de polietileno de 72 cavidades con un volumen de 40 mL, utilizando una mezcla de turba y agrolita (1:1, v/v) como sustrato. Posteriormente y con el fin de adaptar las plantas a cultivo en agua éstas fueron trasplantadas a un sistema de raíz desnuda en charolas de 2.5 L de capacidad con solución nutritiva de Steiner (SNS) al 10% de concentración (Steiner, 1984), y se mantuvieron así durante 16 d. Posteriormente se traspasaron a recipientes de 20 L de capacidad con SNS al 20% durante 34 d. Las soluciones nutritivas se oxigenaron con bombas de aire de dos salidas (ECOPET, Aquakrill, México). Se eliminaron las hojas maduras para evitar la proliferación de hongos en los tallos y se rotaron plantas en su misma charola para evitar etiolación por zona (Figura 1.1).



**Figura 1. 1.** Eliminación de hojas maduras de caña de azúcar en sistema de raíz flotante, para evitar la proliferación de hongos.

El experimento de estrés inicio el día 03 de septiembre de 2019 y finalizó 16 d después. Durante ese tiempo se aumentó la concentración de la SNS al 25% y se renovó cada 7 d. Del mismo modo, para reponer pérdidas por evapotranspiración se adicionó solución nutritiva cada dos días a las unidades experimentales.

#### 1.5.4. Descripción de tratamientos

Se utilizó la SNS, a una concentración de 25% (**Cuadro 1.1**), usando agua destilada y sales grado reactivo de las marcas Fermont, Meyer y J.T. Baker.

**Cuadro 1. 1.** Solución nutritiva universal de Steiner a 25% de su concentración.

Fuente	mol <sub>c</sub> m <sup>-3</sup>	g L <sup>-1</sup>
Nitrato de calcio tetrahidratado [Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O]	2.25	0.2657
Sulfato de magnesio heptahidratado [MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O]	1.00	0.1232
Fosfato monobásico de potasio [KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ]	0.25	0.0340
Nitrato de potasio [KNO <sub>3</sub> ]	0.75	0.0758
Sulfato de potasio [K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ]	0.75	0.0654

Se utilizó el producto comercial Tradecorp® AZ como fuente de micronutrientes, a dosis equivalente en mg L<sup>-1</sup> a: 4.988 Fe, 2.328 Mn, 0.466 Zn, 0.186 Cu, 0.432 B y 0.173 Mo.

Con la finalidad de definir los tratamientos, se tienen como primer factor de estudio el bioestimulante Phi (H<sub>2</sub>PO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en dos concentraciones a partir de ácido fosforoso (H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub>): 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>, estas concentraciones corresponden a 0 y 15% del P total como fosfato en la solución de Steiner al 25%. Como segundo factor de estudio se tiene el estrés en tres niveles: Sin estrés, estrés salino (150 mM NaCl) y en un tercer nivel estrés hídrico [adición de glicol de polietileno 6000 (PEG) al 5%,  $\Psi_o = -0.01900$  MPa a una temperatura de 25°C, el cual se estimó utilizando la ecuación de Michel y Kaufmann (Michel & Kaufmann, 1973). El NaCl, el PEG y el H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub> empleados fueron de las marcas J. T. Baker (PA, USA), Merck (darmstadt, Germany) y Sigma Aldrich-Merck (darmstadt, Germany), respectivamente.

La combinación de los dos niveles del bioestimulante y los tres niveles de estrés dio como resultado seis tratamientos (seis soluciones nutritivas), los potenciales osmóticos de éstos son presentados en el **Cuadro 1.2**. Estos seis tratamientos se ensayaron de manera independiente en los tres cultivares de caña de azúcar antes indicados.

**Cuadro 1. 2.** Potencial osmótico en las SNS en cada uno de los seis tratamientos evaluados.

<b>Bioestimulante Phi (mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Estrés</b>	<b>Potencial osmótico (MPa)</b>
0.0000	Sin estrés	-0.01800
0.0375	Sin estrés	-0.01804
0.0000	Salino (150 mM NaCl)	-0.37800
0.0375	Salino (150 mM NaCl)	-0.37804
0.0000	Hídrico (5% PEG 6000)	-0.01900
0.0375	Hídrico (5% PEG 6000)	-0.02003

PEG: glicol de polietileno 6000, NaCl: cloruro de sodio

El pH de las soluciones nutritivas se ajustó a 5.5 utilizando NaOH 1 N o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N con un medidor portátil de pH, conductividad eléctrica y temperatura (PC18, Conductronic, México).

### 1.5.5. Diseño experimental

Se utilizó un acomodo de tipo factorial 2 × 3 en un diseño experimental completamente al azar (DECA), en el que los factores a evaluar fueron:

Factor bioestimulante: Sin bioestimulante y con bioestimulante a partir de H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub> adicionado a la solución nutritiva.

Factor estrés: Sin estrés, estrés salino y estrés hídrico adicionados a la solución nutritiva.

Se obtuvieron seis tratamientos del acomodo factorial, para cada tratamiento se colocaron ocho plantas por unidad experimental, la que consistió en una cubeta de plástico con capacidad de 20 L, logrando un total de 48 individuos muestra por cultivar de vitroplantas de caña de azúcar.

### 1.5.6. Variables evaluadas

#### A) Parámetros de crecimiento

Después de 16 d del inicio de tratamientos se midieron las variables siguientes:

- Número de hojas.

- Altura de planta en cm al último anillo visible del tallo.
- Diámetro de tallo en mm con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, México).
- Área foliar por planta en cm<sup>2</sup> medida con un integrador de área foliar (LI-3100C, LI-COR, Lincoln, NE, EEUU).
- Peso de biomazas frescas de raíz, tallo y hoja en gramos empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).
- Pesos de biomazas secas de raíz, tallo y hoja en gramos. Se determinaron en muestras secadas durante 72 h a 70 °C en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, México), empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).
- Curva de crecimiento de las hojas de caña de azúcar. Durante cada día de tratamiento, a las 16:00 h y en la hoja de caña menos desarrollada, se registró el crecimiento, capturando el largo y el ancho con una cinta métrica de 3 m de longitud (Truper, México), deteniendo la toma de mediciones cuando es una hoja madura o el registro de largo y ancho se reporta constante. Al final con ayuda de un integrador (LI-3100C, LI-COR, Lincoln, NE, EEUU) se capturó el área foliar final, posteriormente, mediante una regresión lineal se generó el modelo de crecimiento y se graficaron las lecturas tomadas durante todos los días de tratamiento.

## **B) Contenido de nutrimentos y de Na**

Se determinó la concentración de N en los distintos órganos de la planta (raíz, tallo y hoja), empleando el método Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965).

La concentración de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B y Na, se determinó en el extracto resultante de la digestión húmeda del material seco con HNO<sub>3</sub> y HClO<sub>4</sub> (Alcántar-González & Sandoval-Villa, 1999). Los extractos se leyeron en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma Varian 725 ES ICP (Agilent, ICP Optical Emission Spectrometer, 725-ES, USA).

## **C) Contenido de clorofilas y aminoácidos**

Después de 16 d de tratamiento las muestras de raíz, tallo y hoja de plantas de caña de azúcar se almacenaron a una temperatura de -80 °C en un ultracongelador (Thermo Fisher Scientific-Forma 700 Series, Model: 703, Marietta, OH, EEUU). En estas muestras se realizaron las siguientes determinaciones:

- Concentración foliar ( $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) de clorofila *a*, *b*, total y carotenoides. Se realizó por el método espectrométrico de clorofilas y carotenoides (Sumanta *et al.*, 2014), utilizando como solvente extractor acetona al 80% y midiendo absorbancias a 663.2, 646.8 y 470 nm con un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV/Vis, Spectrophotometer Multi-cell changer, UK). Con los resultados se realizaron las estimaciones de clorofilas y carotenoides utilizando las fórmulas siguientes:

$$\text{Clorofila } a \text{ } (\mu\text{g}^{-\text{mL}}) = (12.25 * \text{Abs}_{663.2}) - (0.279 * \text{Abs}_{646.8})$$

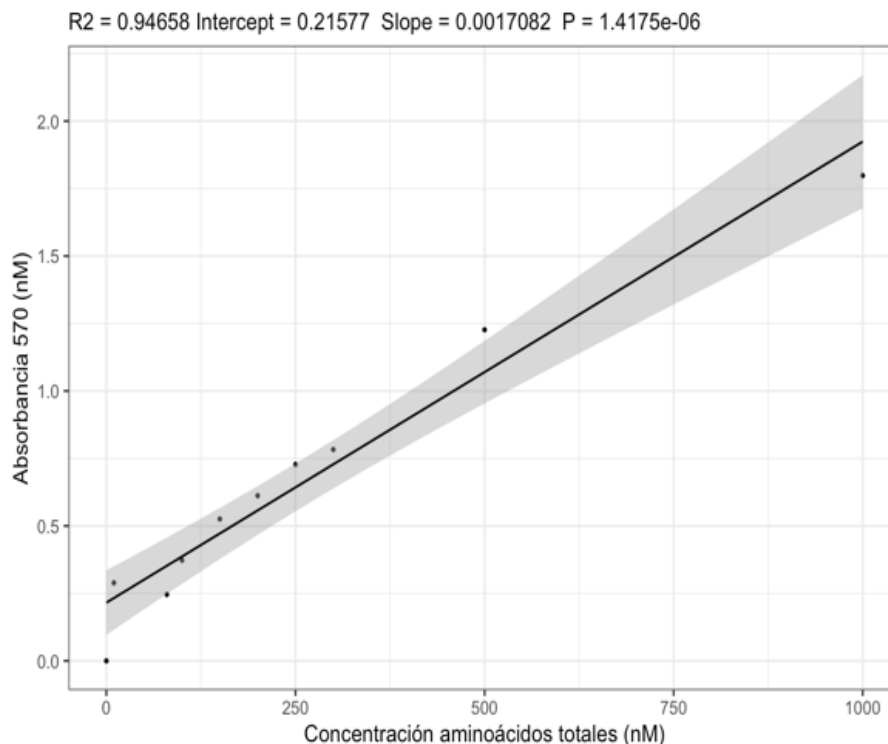
$$\text{Clorofila } b \text{ } (\mu\text{g}^{-\text{mL}}) = (21.5 * \text{Abs}_{646.8}) - (5.1 * \text{Abs}_{663.2})$$

$$\text{Carotenoides } (\mu\text{g}^{-\text{mL}}) = \left( \frac{((1000 * \text{Abs}_{470}) - (1.82 * C_a) - (85.02 * C_b))}{198} \right)$$

Los resultados fueron transformados a  $\mu\text{g g}^{-1}$  de biomasa fresca.

Con la sumatoria de clorofila *a* y clorofila *b* se estimó la concentración de clorofila *total*. Asimismo, se calcularon las relaciones de concentración clorofila *a* / clorofila *b* y clorofila *total* / carotenoides.

- Aminoácidos libres totales en hoja. Se realizó una extracción etanólica (Geiger *et al.*, 1998) y se empleó el método de la ninhidrina (Moore & Stein, 1954). Se utilizó leucina para la elaboración de la curva estándar (**Figura 1.2**) y se leyó a una longitud de onda de 570 nm en un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV / Vis. Spectrophotometer Multi – cell changer, UK).



**Figura 1. 2.** Curva estándar de leucina para cuantificar aminoácidos totales.

#### D) Intercambio de gases

Se midió a los 14 d del inicio de la aplicación de tratamientos con ayuda de un medidor de fotosíntesis (LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE; EEUU) entre 11:30 y 14:30 h (**Cuadro 1.3**), en la hoja madura más joven para obtener la tasa fotosintética máxima:

- Tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- Concentración intracelular de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ )
- Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) en la cámara de la hoja se ajustó a  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , el  $\text{CO}_2$  ambiental y la humedad relativa se usó conforme lo reportó el analizador de gases, adicionalmente se calculó la eficiencia de uso de agua instantánea (WUE)  $WUE = P_N/E$ , la eficiencia de uso del agua intrínseca  $WUE_i = P_N/g_s$  y el contenido de agua (WC)  $WC = (((\text{Peso de biomasa fresca de hoja} - \text{Peso de biomasa seca de hoja}) / \text{Peso de biomasa fresca de hoja}) \times 100)$  en hojas de plantas de caña de azúcar (Karimi *et al.*, 2015).

**Cuadro 1. 3.** Datos climáticos al momento de realizar lecturas de fotosíntesis

Semana	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)
	media	media (11-14 h)	Punto rocío	
1	22.18	38.24	9.69	52.46
2	20.88	35.24	10.32	59.21

### 1.5.7. Análisis estadístico

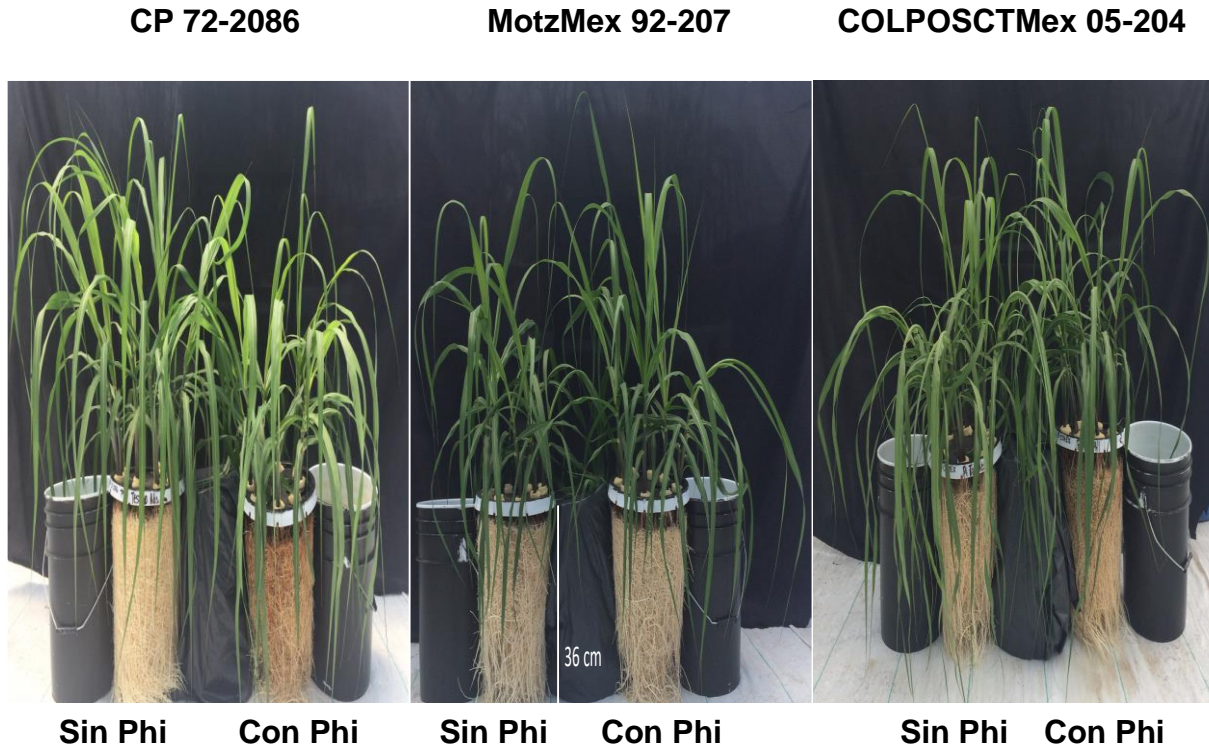
Para el análisis estadístico de los datos se utilizaron cuatro muestras biológicas por tratamiento. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA; Univariado modelo lineal generalizado), una prueba de comparación de medias de Tukey donde los resultados con ( $P$ -value < 0.05) se considera significativos utilizando el software SAS OnDemand for Academics (SAS Institute Inc., USA). Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) en hojas de los tres cultivares de caña utilizando la librería FactoMineR del software Rstudio v.1.2.1335 (R Core Team, 2018).



## 1.6 RESULTADOS

### 1.6.1. Parámetros de crecimiento

En situación de ausencia de estrés, se observan ligeras quemaduras en el cv. CP 72-2086 y COLPOSCTMex 05-204; De igual modo, se aprecia que el cv. MotzMex 92-207 presenta mejor desarrollo radical que el tratamiento en sin adición de Phi. (**Figura 1.3**).



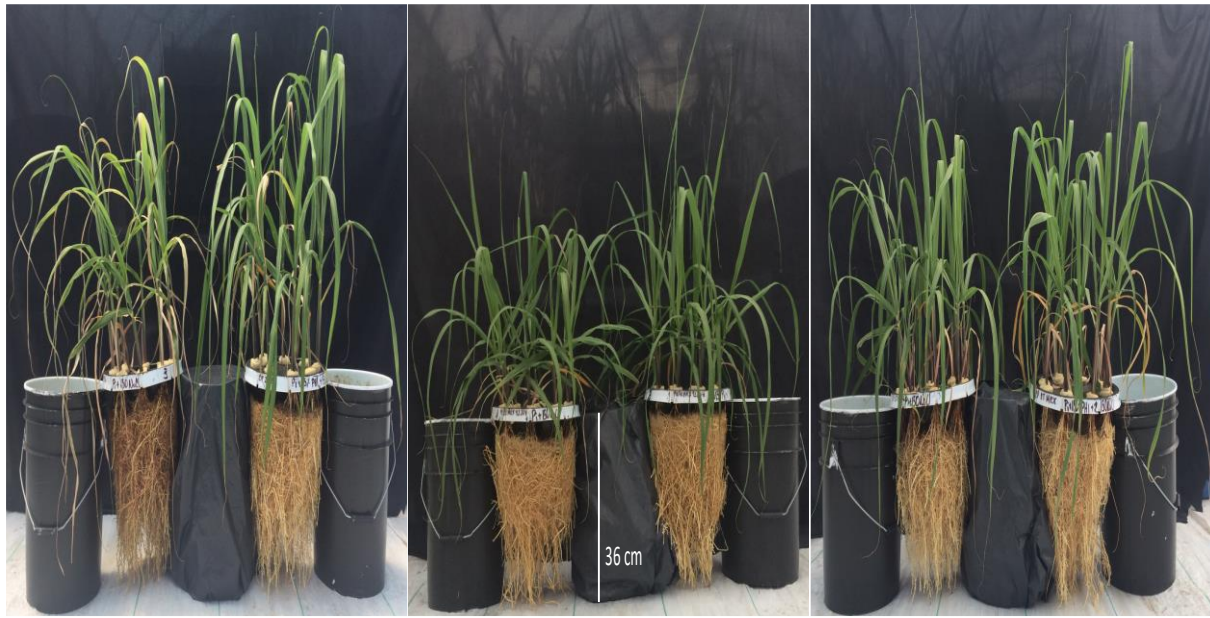
**Figura 1. 3.** Plantas de tres cultivares de caña de azúcar bajo dos concentraciones de Phi ( $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) a partir de ácido fosforoso ( $\text{H}_3\text{PO}_3$ ). Sin y con Phi ( $0$  y  $0.0375 \text{ mol}_e \text{ m}^{-3}$ ).

Por otro lado, en los cultivares CP 72-2086 y MotzMex 92-207 se aprecian efectos positivos de la adición del bioestimulante Phi cuando se tiene presencia de estrés salino. Dichos efectos positivos se reflejan en la mayor cantidad de raíces y de hojas sanas. Contrario a lo que se observa en el cv. COLPOSCTMex 05-204 donde la adición de Phi como bioestimulante no ayuda a mitigar el efecto salino (**Figura 1.4**).

CP 72-2086

MotzMex 92-207

COLPOSCTMex 05-204



Sin Phi

Con Phi

Sin Phi

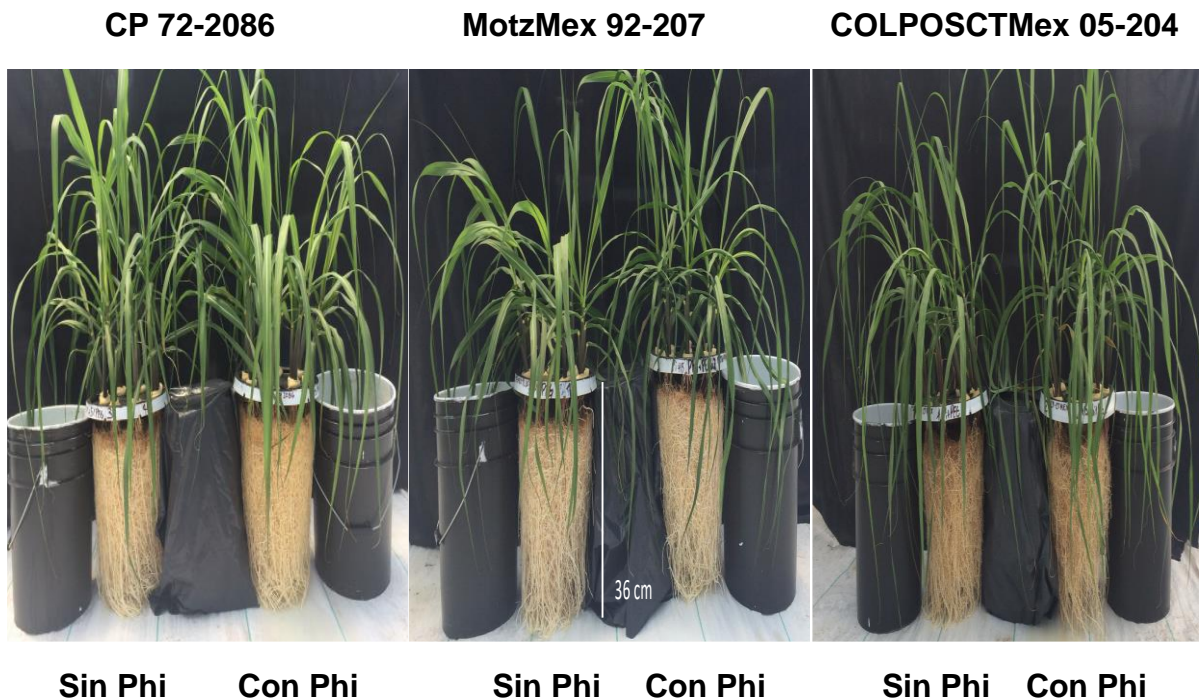
Con Phi

Sin Phi

Con Phi

**Figura 1. 4.** Plantas de tres cultivares de caña de azúcar bajo dos concentraciones de Phi ( $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) a partir de ácido fosforoso ( $\text{H}_3\text{PO}_3$ ) en presencia de estrés salino (150 mM de NaCl). Sin y con Phi (0 y  $0.0375 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ ).

Por otra parte, de manera visual no se observaron diferencias en crecimiento con el suministro de Phi con estrés hídrico (**Figura 1.5**).



**Figura 1. 5.** Plantas de tres cultivares de caña de azúcar bajo dos concentraciones de Phi ( $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) a partir de ácido fosforoso ( $\text{H}_3\text{PO}_3$ ) en presencia de estrés hídrico (5% PEG 6000). Sin y con Phi (0 y  $0.0375 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ ).

En situación de estrés por salinidad y déficit hídrico se observó reducción general en las variables de crecimiento evaluadas en plantas de caña de azúcar de los tres cultivares (**Cuadros 1.4, 1.5 y 1.6**). En el cultivar CP 72-2086 se aprecia la letalidad del estrés salino al reducir de manera significativa en un 16.0, 19.9, 32.1, 37.6, 33.6, 28.1 y 35.0% la altura de planta, el diámetro de tallo, la biomasa seca aérea, y los pesos fresco y seco de tallo y hoja (**Cuadro 1.4**).

Se observa que, en ausencia de estrés, la adición de Phi tiene efectos negativos en el crecimiento, reduciendo en 16.5, 9.5, 33.3, 18.3, 19.7, 22.9, 21.01 y 16.2% la altura de planta, el diámetro basal de tallo, el área foliar, la biomasa seca aérea, y los pesos fresco y seco de tallo y hoja, respectivamente. Por el contrario, bajo estrés salino, la adición de Phi incrementó 17.3, 56.6, 33.3, 58.1, 64.9, 49.8 y 21.6% el diámetro de tallo, el área foliar, la biomasa seca aérea, los pesos fresco y seco de tallo y hoja, siendo este aumento significativo en el peso fresco de hoja. Mientras que en situación por déficit hídrico se

incrementó en un 3.5 y 13.9 % la biomasa seca aérea y el peso seco de tallo (**Cuadro 1.4**).

En el cultivar MotzMex 92-207 se aprecia una reducción significativa de un 27.1, 16.3, 31.0, 28.0, 44.0, 45.0, 20.6 y 32.4% en la altura de planta, el diámetro de tallo, el área foliar, la biomasa seca aérea, y los pesos fresco y seco de tallo y hoja en situación de estrés salino, así como de un 13.7, 11.3, 26.6, 30.8 y 24.8% en la altura de planta, el diámetro de tallo, el área foliar, el peso fresco de tallo y hoja en situación de estrés hídrico (**Cuadro 1.5**).

El tratamiento de Phi como bioestimulante en ausencia de factores de estrés incrementó significativamente la altura de planta y el peso de biomasa fresca de hojas, con aumentos de 9.7 y 13.2%, respectivamente, en el cv. MotzMex 92-207 (**Cuadro 1.5**). En este cultivar, la adición de Phi bajo estrés salino, incrementó en 18.6, 22.7, 9.3 y 9.3% la altura, el área foliar, la biomasa seca aérea y el peso de biomasa seca de hoja; por otro lado, bajo estrés hídrico, el Phi aumentó en 18.1, 2.8, 34.9 y 11.9% la altura, el diámetro de tallo, el peso de biomasa fresca y seca de hojas (**Cuadro 1.5**).

En el cultivar COLPOS CTMex 05-204 se aprecia una reducción significativa de un 32.6, 25.2, 38.4, 44.0, 45.9 y 42.8% en la altura de planta, el diámetro de tallo, la biomasa seca aérea, el peso fresco de tallo y el peso fresco y seco de hoja en situación de estrés salino, así como, de un 16.8% en la altura de planta en situación de estrés hídrico (**Cuadro 1.6**).

En el cv. COLPOS CTMex 05-204, la adición de Phi en ausencia de factores de estrés, presenta solo una respuesta negativa al reducir en 7.1% la altura de planta. Por el contrario, incrementó en 10.3, 25, 18 y 27.5% el diámetro de tallo, la biomasa seca y el peso de biomasa fresca y seca de hojas de caña. Por otra parte, en condiciones de estrés salino, la adición de Phi ocasionó respuestas negativas en las variables evaluadas, al disminuir 8.4, 12.3 y 18.9% la altura, el diámetro de tallo y la biomasa seca aérea de caña de azúcar (**Cuadro 1.6**).

**Cuadro 1. 4.** Variables de crecimiento en plantas del cultivar CP 72-2086 de caña de azúcar.

<b>Factor</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Ø de tallo (mm)</b>	<b>Área foliar (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	21.45 ± 2.9 a	16.08 ± 2.7 a	409.49 ± 144.0 a
Con Phi	19.83 ± 2.1 a	16.33 ± 1.4 a	398.36 ± 65.7 a
Pr(>F)	0.0556	0.6367	0.7503
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	22.01 ± 3.2 a	17.63 ± 1.7 a	443.15 ± 133.3 a
Estrés salino (NaCl)	18.49 ± 1.8 b	14.13 ± 1.8 b	349.68 ± 93.2 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	21.41 ± 1.0 a	16.88 ± 0.6 a	418.94 ± 87.6 a
Pr(>F)	0.0042	<0.0001	0.0985
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	24.00 ± 2.6 a	18.50 ± 1.3 a	531.74 ± 107.1 a
Con Phi + sin estrés	20.03 ± 2.6 ab	16.75 ± 1.7 ab	354.57 ± 95.0 ab
Sin Phi + Estrés salino	18.73 ± 2.2 b	13.00 ± 1.8 c	272.56 ± 56.3 b
Con Phi + Estrés salino	18.25 ± 1.1 b	15.25 ± 1.0 bc	426.80 ± 35.1 ab
Sin Phi + Estrés hídrico	21.63 ± 1.0 ab	16.75 ± 0.5 ab	424.17 ± 127.3 ab
Con Phi + Estrés hídrico	21.20 ± 1.1 ab	17.00 ± 0.8 ab	413.71 ± 40.5 ab
Pr(>F)	0.0062	0.0002	0.0109
<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca aérea (g)</b>	<b>Biomasa fresca de tallos (g)</b>	<b>Biomasa fresca de hojas (g)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	7.85±2.2a	24.25 ± 9.7 a	17.58 ± 6.2 a
Con Phi	7.93±1.4a	25.63 ± 7.8 a	17.11 ± 2.3 a
Pr(>F)	0.8384	0.6474	0.6122
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	8.76±1.6a	29.73 ± 10.8 a	18.80 ± 3.7 a
Estrés salino (NaCl)	5.95±1.1b	18.54 ± 5.4 b	12.48 ± 3.6 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	8.96±0.8a	26.55 ± 4.8 ab	20.76 ± 2.3 a
Pr(>F)	<0.0001	0.0185	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	9.64 ± 1.3 a	32.97 ± 8.8 a	21.24 ± 1.2 ab
Con Phi + sin estrés	7.88 ± 1.5 ab	26.48 ± 13.0 ab	16.37 ± 3.8 bc
Sin Phi + Estrés salino	5.10 ± 0.8 c	14.37 ± 4.4 b	9.42 ± 1.8 d
Con Phi + Estrés salino	6.80 ± 0.6 bc	22.72 ± 1.8 ab	15.53 ± 1.4 c
Sin Phi + Estrés hídrico	8.81 ± 0.6 ab	25.41 ± 4.1 ab	22.07 ± 2.0 a
Con Phi + Estrés hídrico	9.12 ± 1.0 a	27.69 ± 5.7 ab	19.45 ± 2.0 abc
Pr(>F)	<0.0001	0.0434	<0.0001

<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca de tallos (g)</b>	<b>Biomasa seca de hojas (g)</b>
<b>Bioestimulante</b>		
Sin Phi	3.29 ± 1.1 a	4.56 ± 1.3 a
Con Phi	3.52 ± 0.8 a	4.42 ± 0.8 a
Pr(>F)	0.4710	0.4687
<b>Estrés</b>		
Sin estrés	3.70 ± 1.1 a	5.06 ± 0.7 a
Estrés salino (NaCl)	2.66 ± 0.8 b	3.29 ± 0.5 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	3.84 ± 0.6 a	5.12 ± 0.4 a
Pr(>F)	0.0128	<0.0001
<b>Tratamiento</b>		
Sin Phi + sin estrés	4.14 ± 1.0 a	5.50 ± 0.6 a
Con Phi + sin estrés	3.27 ± 1.1 ab	4.61 ± 0.6 ab
Sin Phi + Estrés salino	2.13 ± 0.7 b	2.97 ± 0.4 c
Con Phi + Estrés salino	3.19 ± 0.3 ab	3.61 ± 0.3 bc
Sin Phi + Estrés hídrico	3.59 ± 0.6 ab	5.21 ± 0.5 a
Con Phi + Estrés hídrico	4.09 ± 0.8 a	5.03 ± 0.4 a
Pr(>F)	0.0180	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.



**Cuadro 1. 5.** Variables de crecimiento en plantas del cultivar MotzMex 92-207 de caña de azúcar.

<b>Factor</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Ø de tallo (mm)</b>	<b>Área foliar (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	14.58 ± 3.0 b	13.93 ± 1.6 a	307.63 ± 70.3 a
Con Phi	15.99 ± 1.9 a	13.83 ± 1.3 a	313.26 ± 91.2 a
Pr(>F)	0.0278	0.8074	0.8010
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	17.69 ± 1.5 a	15.28 ± 1.1 a	384.23 ± 64.2 a
Estrés salino (NaCl)	12.90 ± 1.5 c	12.79 ± 0.8 b	265.02 ± 46.4 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	15.26 ± 2.0 b	13.56 ± 0.9 b	282.08 ± 71.5 b
Pr(>F)	<0.0001	0.0003	0.0006
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	17.93 ± 2.0 a	15.63 ± 1.3 a	358.03 ± 73.1 ab
Con Phi + sin estrés	17.45 ± 1.2 a	14.92 ± 0.9 ab	410.43 ± 49.3 a
Sin Phi + Estrés salino	11.80 ± 1.3 c	12.77 ± 0.5 b	238.01 ± 33.5 b
Con Phi + Estrés salino	14.00 ± 0.8 bc	12.81 ± 1.2 b	292.04 ± 44.2 ab
Sin Phi + Estrés hídrico	14.00 ± 1.6 bc	13.38 ± 0.9 b	326.85 ± 36.4 ab
Con Phi + Estrés hídrico	16.53 ± 1.6 ab	13.75 ± 1.0 ab	237.31 ± 72.5 b
Pr(>F)	<0.0001	0.0029	0.0013
<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca aérea (g)</b>	<b>Biomasa fresca de tallos (g)</b>	<b>Biomasa fresca de hojas (g)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	6.22 ± 1.3 a	14.42 ± 4.4 a	14.29 ± 4.8 b
Con Phi	6.39 ± 1.0 a	15.23 ± 4.0 a	16.17 ± 3.9 a
Pr(>F)	0.6327	0.3354	0.0394
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	7.17 ± 0.8 a	19.75 ± 1.8 a	19.85 ± 2.3 a
Estrés salino (NaCl)	5.16 ± 0.8 b	11.07 ± 1.6 c	10.92 ± 1.9 c
Estrés hídrico (PEG 6000)	6.58 ± 0.9 a	13.66 ± 2.3 b	14.93 ± 2.9 b
Pr(>F)	0.0005	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	7.35 ± 1.0 a	19.57 ± 2.4 a	19.97 ± 2.8 a
Con Phi + sin estrés	6.99 ± 0.6 ab	19.92 ± 1.4 a	19.72 ± 2.0 a
Sin Phi + Estrés salino	4.93 ± 0.8 c	13.09 ± 1.5 b	10.19 ± 1.9 c
Con Phi + Estrés salino	5.39 ± 0.8 bc	11.55 ± 1.7 b	11.65 ± 1.8 c
Sin Phi + Estrés hídrico	6.37 ± 0.8 abc	13.09 ± 2.5 b	12.71 ± 1.7 bc
Con Phi + Estrés hídrico	6.78 ± 1.0 abc	14.23 ± 2.4 b	17.15 ± 2.0 ab
Pr(>F)	0.0048	<0.0001	<0.0001

<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca de tallos (g)</b>	<b>Biomasa seca de hojas (g)</b>
<b>Bioestimulante</b>		
Sin Phi	2.34 ± 0.4 a	3.88 ± 0.9 a
Con Phi	2.38 ± 0.4 a	4.01 ± 0.8 a
Pr(>F)	0.7714	0.5740
<b>Estrés</b>		
Sin estrés	2.67 ± 0.3 a	4.50 ± 0.5 a
Estrés salino (NaCl)	2.12 ± 0.3 b	3.04 ± 0.5 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	2.28 ± 0.3 ab	4.29 ± 0.6 a
Pr(>F)	0.0133	<0.0001
<b>Tratamiento</b>		
Sin Phi + sin estrés	2.66 ± 0.4 a	4.69 ± 0.7a
Con Phi + sin estrés	2.68 ± 0.3 a	4.31 ± 0.4 ab
Sin Phi + Estrés salino	2.02 ± 0.3 a	2.91 ± 0.5 c
Con Phi + Estrés salino	2.21 ± 0.4 a	3.18 ± 0.5 bc
Sin Phi + Estrés hídrico	2.32 ± 0.4 a	4.05 ± 0.6 abc
Con Phi + Estrés hídrico	2.25 ± 0.4 a	4.53 ± 0.6 a
Pr(>F)	0.0824	0.0007

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.



**Cuadro 1. 6.** Variables de crecimiento en plantas del cultivar COLPOS CTMex 05-204 de caña de azúcar.

<b>Factor</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Ø de tallo (mm)</b>	<b>Área foliar (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	20.63 ± 4.2 a	15.92 ± 2.1 a	265.06 ± 81.8 a
Con Phi	20.27 ± 4.7 a	15.83 ± 3.4 a	265.78 ± 115.7 a
Pr(>F)	0.7720	0.9221	0.9844
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	24.48 ± 3.9 a	17.88 ± 2.1 a	320.92 ± 117.6 a
Estrés salino (NaCl)	16.50 ± 2.1 c	13.38 ± 1.9 b	243.77 ± 91.6 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	20.36 ± 2.4 b	16.38 ± 2.1 a	231.57 ± 63.0 a
Pr(>F)	0.0002	0.0013	0.1177
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	25.38 ± 3.0 a	17.00 ± 2.0 ab	270.49 ± 59.3 a
Con Phi + sin estrés	23.58 ± 5.0 ab	18.75 ± 2.1 a	371.35 ± 148.3 a
Sin Phi + Estrés salino	17.23 ± 0.6 bc	14.25 ± 1.0 ab	297.34 ± 108.1 a
Con Phi + Estrés salino	15.78 ± 2.9 c	12.50 ± 2.4 b	190.20 ± 15.5 a
Sin Phi + Estrés hídrico	19.28 ± 2.8 abc	16.50 ± 2.4 ab	227.36 ± 77.6 a
Con Phi + Estrés hídrico	21.45 ± 1.8 abc	16.25 ± 2.2 ab	235.78 ± 56.4 a
Pr(>F)	0.0017	0.0074	0.1148
<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca aérea (g)</b>	<b>Biomasa fresca de tallos (g)</b>	<b>Biomasa fresca de hojas (g)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	5.92 ± 1.8 a	16.61 ± 5.9 a	13.16 ± 4.4 a
Con Phi	6.63 ± 2.3 a	17.96 ± 7.2 a	14.65 ± 5.7 a
Pr(>F)	0.3191	0.5491	0.3641
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	7.47±1.8 a	21.96 ± 5.5 a	17.94 ± 4.5 a
Estrés salino (NaCl)	4.60±0.8 b	12.30 ± 2.3 b	9.71 ± 1.3 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	6.76±2.3 a	17.59 ± 7.0 ab	14.06 ± 4.8 ab
Pr(>F)	0.0092	0.0080	0.0021
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	6.64 ± 1.1 ab	20.84 ± 4.4 a	16.46 ± 2.6 ab
Con Phi + sin estrés	8.30 ± 2.0 a	23.07 ± 6.9 a	19.42 ± 5.8 a
Sin Phi + Estrés salino	5.08 ± 0.7 ab	13.60 ± 1.5 a	10.34 ± 1.1 b
Con Phi + Estrés salino	4.12 ± 0.8b	11.00 ± 2.4 a	9.07 ± 1.3 b
Sin Phi + Estrés hídrico	6.03 ± 3.0 ab	15.38 ± 8.3 a	12.68 ± 6.0 ab
Con Phi + Estrés hídrico	7.48 ± 1.5 ab	19.80 ± 5.7 a	15.45 ± 3.4 ab
Pr(>F)	0.0289	0.0393	0.0128

Factor	Biomasa seca de tallos (g)	Biomasa seca de hojas (g)
<b>Bioestimulante</b>		
Sin Phi	2.54 ± 0.8 a	3.37 ± 1.0 a
Con Phi	2.74 ± 0.9 a	3.89 ± 1.5 a
Pr(>F)	0.5407	0.2149
<b>Estrés</b>		
Sin estrés	2.96 ± 0.6 a	4.51 ± 1.2 a
Estrés salino (NaCl)	2.01 ± 0.5 a	2.58 ± 0.4 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	2.95 ± 1.1 a	3.80 ± 1.3 ab
Pr(>F)	0.0384	0.0035
<b>Tratamiento</b>		
Sin Phi + sin estrés	2.68 ± 0.5 a	3.96 ± 0.6 ab
Con Phi + sin estrés	3.24 ± 0.6 a	5.05 ± 1.4 a
Sin Phi + Estrés salino	2.26 ± 0.4 a	2.82 ± 0.3 b
Con Phi + Estrés salino	1.76 ± 0.4 a	2.35 ± 0.4 b
Sin Phi + Estrés hídrico	2.69 ± 1.4 a	3.34 ± 1.6 ab
Con Phi + Estrés hídrico	3.22 ± 0.8 a	4.26 ± 0.8 ab
Pr(>F)	0.1091	0.0119

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

### 1.6.2. Concentraciones nutrimentales y de Na en el cv. CP 72-2086

El Phi en el cv. CP 72-2086 redujo significativamente la concentración foliar de K, S, Mn y Na con decrementos de 8.6, 15.8, 18.8 y 55.2% (**Cuadro 1.7**).

En el cv. CP 72-2086, la salinidad redujo la concentración foliar de N, P, Ca, S y Cu, en 14.5, 17.3, 33.3, 46.1 y 24.7%, respectivamente, en comparación con el testigo sin estrés. Por el contrario, la salinidad incrementó la concentración de K, Mn, B y Na en 14.6, 31.6, 89.4 y 39.4%, respectivamente. Por otra parte, el estrés hídrico incrementó significativamente la concentración de Mn en 21.5% en comparación con plantas sin estrés, y afectó de manera negativa la concentración de N, P y Cu (**Cuadro 1.7**).

Asimismo, la adición de Phi en ausencia de estrés en el cv. CP 72-2086, redujo significativamente en 37.5 y 55.1% la concentración de S y Mn; además de reducir la concentración de N, Ca y Cu. Bajo estrés salino, el Phi incrementó en 28.1% la concentración de Mg y tuvo un efecto positivo en las de N, S y Zn; por otra parte, redujo

en 16, 27.1 y 58% las concentraciones foliares de K, Fe, y Na, así como un efecto negativo en la concentración de Cu. El estrés por déficit hídrico redujo la concentración foliar de Mg y Zn, e incrementó ligeramente la de Ca de este cultivar (**Cuadro 1.7**).

El Phi en el cv. CP 72-2086, redujo la concentración en tallo de N, Zn, Mn y Na en 15.7, 33.0, 29.7 y 51.6%, respectivamente (**Cuadro 1.8**).

En tallos del cv. CP 72-2086, el estrés salino redujo de manera significativa la concentración de K, Ca, Mg y S, con decrementos de 13, 45.1, 25.5 y 43.9% en comparación con plantas sin estrés, e incrementó la de Na en 3091%. El estrés salino también incrementó la concentración de Zn. Por otra parte, el estrés hídrico incrementó la concentración de Zn en 55.3% y redujo la concentración de N en 23.8% además de afectar de manera negativa la concentración de Mg (**Cuadro 1.8**).

La adición de Phi como bioestimulante en ausencia de factores de estrés en el cv. 72-2086, redujo significativamente en 27.3 y 48.2% la concentración en tallos de S y Mn, respectivamente; además de afectar de manera negativa la concentración de Mg y Zn e incrementar ligeramente la concentración de Ca. En condiciones de estrés salino, se redujo significativamente la concentración en tallos de Na en casi 50%, así como las concentraciones de N, Ca, Mg, y S. El estrés hídrico redujo ligeramente las concentraciones en tallos de N y Zn e incrementó S (**Cuadro 1.8**).

Al analizar los efectos principales del Phi en el cv. CP 72-2086, se observa que éste, redujo de forma significativa la concentración en tallo de N, Zn, Mn y Na en 15.7, 33.0, 29.7 y 51.6%, respectivamente (**Cuadro 1.8**).

En tallos del cv. CP 72-2086, se aprecia que el estrés por salinidad redujo de manera significativa la concentración de K, Ca, Mg y S, con decrementos del orden de 13, 45.1, 25.5 y 43.9% en comparación con plantas sin estrés, e incrementó la concentración de Na en 3091%. El estrés salino también incrementó la concentración de Zn. Por otra parte, el estrés hídrico incrementó significativamente la concentración de Zn en 55.3% y redujo la concentración de N en 23.8% además de afectar de manera negativa la concentración de Mg (**Cuadro 1.8**).

La adición de Phi como bioestimulante en ausencia de factores de estrés en el cv. 72-2086, redujo significativamente en 27.3 y 48.2% la concentración en tallos de S y Mn, respectivamente; además de afectar de manera negativa la concentración de Mg y Zn e incrementar ligeramente la concentración de Ca. En condiciones de estrés salino, se redujo significativamente la concentración en tallos de Na en casi 50%, así como las concentraciones de N, Ca, Mg, y S. El estrés por déficit hídrico redujo ligeramente las concentraciones en tallos de N y Zn e incrementó S (**Cuadro 1.8**).

El Phi redujo en el cv. CP 72-2086 la concentración en raíces de N, P, Ca, Mg, Fe, Cu y Zn en 14.8, 7.2, 11.6, 9.8, 30.5, 25.9 y 7.9%; e incrementó las concentraciones de K, Mn y Na en 7.53, 17.65 y 5.43% en las raíces (**Cuadro 1.9**).

En el **Cuadro 1.9**, se aprecia que el estrés por salinidad en el cv. CP 72-2086 redujo de forma significativa la concentración en raíces de K, Ca, Mg, S y Zn en 70.7, 26.1, 41.8, 32.9 y 17.0% e incrementó la concentración en raíces de P, Fe y Na en un 22.5, 105.5 y 6245%. Por otra parte, el estrés hídrico redujo significativamente la concentración de P, K, Ca, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B en un 31, 25.9, 34.8, 27, 49, 24.8, 83.1, 58.3 y 38.28%, respectivamente.

La adición de Phi en ausencia de factores de estrés redujo significativamente en 15.9% la concentración de Mg en raíces del cv. CP 72-2086, e incrementó la concentración de Fe, Zn y Mn en 73.7, 1.7, y 41.8%, respectivamente. En condiciones de estrés salino, el Phi ocasionó la reducción en las concentraciones en raíces de P, Fe y Cu en 12.3, 52.6 y 37.3%; asimismo, incrementó en 40.9 y 7.04%, las concentraciones de Mn y Na en raíces. El estrés por déficit hídrico redujo significativamente las concentraciones en raíces de P, Fe, Cu y Zn en 23, 51.7, 42.9 y 25.5% del cv. CP 72-2086 (**Cuadro 1.9**).

**Cuadro 1. 7.** Concentración de nutrientes y de Na<sup>+</sup> en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	24.47 ± 3.6 a	3.08 ± 0.4 a	15.02 ± 1.8 a
Con Phi	25.05 ± 2.8 a	3.01 ± 0.4 a	13.73 ± 0.8 b
Pr(>F)	0.5493	0.6242	0.0002
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	26.91 ± 1.9a	3.30 ± 0.4 a	13.85 ± 1.0 b
Estrés salino (NaCl)	23.01 ± 4.2b	2.73 ± 0.2 b	15.87 ± 1.5 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	24.37 ± 1.6ab	3.10 ± 0.4 ab	13.41 ± 0.4 b
Pr(>F)	0.0121	0.0103	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	28.26 ± 1.6 a	3.26 ± 0.5a	14.10 ± 1.2b
Con Phi + sin estrés	25.55 ± 0.9 ab	3.35±0.3a	13.60 ± 0.9b
Sin Phi + Estrés salino	20.48 ± 1.9 b	2.79±0.1a	17.24 ± 0.6a
Con Phi + Estrés salino	25.55 ± 4.5 ab	2.67±0.2a	14.49 ± 0.1b
Sin Phi + Estrés hídrico	24.68 ± 0.6 ab	3.19±0.4a	13.73 ± 0.4b
Con Phi + Estrés hídrico	24.06 ± 2.4 ab	3.00±0.4a	13.09 ± 0.2b
Pr(>F)	0.0062	0.0625	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	5.28 ± 1.2 a	2.48 ± 0.4 a	4.62 ± 1.6 a
Con Phi	4.88 ± 0.8 a	2.51 ± 0.3 a	3.89 ± 0.9 b
Pr(>F)	0.0565	0.7653	0.0001
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	5.91 ± 0.8 a	2.60 ± 0.4 a	5.12 ± 1.3 a
Estrés salino (NaCl)	3.94 ± 0.3 b	2.55 ± 0.2 a	2.76 ± 0.1 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	5.39 ± 0.3 a	2.33 ± 0.3 a	4.87 ± 0.4 a
Pr(>F)	<0.0001	0.0877	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	6.45 ± 0.7a	2.75 ± 0.5ab	6.30 ± 0.6a
Con Phi + sin estrés	5.38 ± 0.5ab	2.46 ± 0.2ab	3.94 ± 0.3c
Sin Phi + Estrés salino	4.01 ± 0.4c	2.24 ± 0.1b	2.70 ± 0.1d
Con Phi + Estrés salino	3.86 ± 0.3c	2.87 ± 0.0a	2.82 ± 0.2d
Sin Phi + Estrés hídrico	5.37 ± 0.5b	2.46 ± 0.3ab	4.84 ± 0.3b
Con Phi + Estrés hídrico	5.40 ± 0.3ab	2.21 ± 0.1b	4.90 ± 0.5b
Pr(>F)	<0.0001	0.0065	<0.0001

<b>Factor</b>	<b>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	91.09 ± 13.4 a	11.11 ± 1.9 a	28.90 ± 7.9 a
Con Phi	89.35 ± 14.3 a	9.97 ± 1.8 a	30.20 ± 9.0 a
Pr(>F)	0.6803	0.0718	0.6556
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	92.54 ± 6.1 a	12.15 ± 1.6 a	26.73 ± 8.7 a
Estrés salino (NaCl)	90.67 ± 16.6 a	9.15 ± 1.5 b	33.66 ± 8.9 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	87.45 ± 16.8 a	10.32 ± 1.3 ab	28.25 ± 6.4 a
Pr(>F)	0.6096	0.0023	0.1459
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	89.49 ± 6.3ab	12.78 ± 1.6 a	27.47 ± 10.0 ab
Con Phi + sin estrés	95.58 ± 4.8ab	11.52 ± 1.6 ab	26.00 ± 8.6 ab
Sin Phi + Estrés salino	104.88 ± 6.1a	9.87 ± 1.9 ab	27.05 ± 7.6 ab
Con Phi + Estrés salino	76.47 ± 8.0b	8.43 ± 0.3 b	40.27 ± 3.3 a
Sin Phi + Estrés hídrico	78.47±11.2b	10.67 ± 0.7 ab	32.18 ± 6.9 ab
Con Phi + Estrés hídrico	95.98±8.0ab	9.96 ± 1.8 ab	24.33 ± 2.2 b
Pr(>F)	0.0074	0.0098	0.0488
<b>Factor</b>	<b>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>B (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Na (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	487.55 ± 74.1 a	24.83 ± 7.5 a	6500.21 ± 9332.3 a
Con Phi	395.93 ± 134.5 b	25.77 ± 9.2 a	2861.44 ± 3788.6 b
Pr(>F)	0.0012	0.5452	<0.0001
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	375.18 ± 159.9 b	18.55 ± 2.8 b	330.67 ± 63.5 b
Estrés salino (NaCl)	493.89 ± 72.7 a	35.13 ± 3.4 a	13371.00 ± 6426.5 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	456.15 ± 70.5 a	22.13 ± 5.2 b	340.91 ± 45.1 b
Pr(>F)	0.0023	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	517.70 ± 63.6 a	20.42 ± 2.2 b	322.31 ± 60.7 c
Con Phi + sin estrés	232.67 ± 38.3 b	16.68 ± 2.2 b	339.03 ± 74.6 c
Sin Phi + Estrés salino	450.00 ± 75.7 a	34.25 ± 2.3 a	18836.00 ± 3872.5 a
Con Phi + Estrés salino	537.77 ± 38.5 a	36.19 ± 4.4 a	7906.00 ± 1 314.9 b
Sin Phi + Estrés hídrico	494.94 ± 84.9 a	19.83 ± 4.3 b	342.52 ± 64.1 c
Con Phi + Estrés hídrico	417.37 ± 18.9 a	24.44 ± 5.6 b	339.03 ± 25.2 c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

**Cuadro 1. 8.** Concentración de nutrientes y de Na<sup>+</sup> en tallos de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	19.10 ± 3.1 a	3.65 ± 0.4 a	22.93 ± 3.5 a
Con Phi	16.10 ± 3.5 b	3.28 ± 0.4 a	22.65 ± 1.8 a
Pr(>F)	0.0059	0.0625	0.7714
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	18.99 ± 1.4 a	3.44 ± 0.4 a	23.74 ± 3.2 a
Estrés salino (NaCl)	19.34 ± 4.1 a	3.43 ± 0.6 a	20.66 ± 1.8 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	14.48 ± 2.4 b	3.52 ± 0.4 a	23.97 ± 1.7 a
Pr(>F)	0.0009	0.9069	0.0208
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	19.43 ± 1.6 ab	3.44 ± 0.6 a	24.41 ± 4.6 a
Con Phi + sin estrés	18.55 ± 1.2 ab	3.44 ± 0.3 a	23.06 ± 1.4 a
Sin Phi + Estrés salino	21.96 ± 2.7 a	3.70 ± 0.3 a	19.80 ± 1.3 a
Con Phi + Estrés salino	16.71 ± 3.8 abc	3.16 ± 0.7 a	21.52 ± 1.9 a
Sin Phi + Estrés hídrico	15.93 ± 0.7 bc	3.81 ± 0.4 a	24.59 ± 1.6 a
Con Phi + Estrés hídrico	13.04 ± 2.7 c	3.24 ± 0.2 a	23.36 ± 1.8 a
Pr(>F)	0.0010	0.3334	0.0795
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	2.58 ± 0.7 a	2.76 ± 0.5 a	6.29 ± 2.0 a
Con Phi	2.47 ± 0.9 a	2.49 ± 0.5 a	5.55 ± 1.5 a
Pr(>F)	0.5900	0.1460	0.0550
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	3.19 ± 0.6 a	2.98 ± 0.4 a	7.16 ± 1.6 a
Estrés salino (NaCl)	1.75 ± 0.6 b	2.22 ± 0.6 b	4.02 ± 0.9 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	2.64 ± 0.4 a	2.68 ± 0.2 ab	6.57 ± 0.6 a
Pr(>F)	0.0001	0.0093	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	3.09 ± 0.6 ab	3.03 ± 0.6 a	8.29 ± 1.6 a
Con Phi + sin estrés	3.30 ± 0.6a	2.93 ± 0.2 ab	6.03 ± 0.1 bc
Sin Phi + Estrés salino	2.11 ± 0.7 bc	2.44 ± 0.5 ab	4.39 ± 1.3 cd
Con Phi + Estrés salino	1.39 ± 0.1 c	1.99 ± 0.7 b	3.66 ± 0.2 d
Sin Phi + Estrés hídrico	2.55 ± 0.5 ab	2.82 ± 0.2 ab	6.20 ± 0.3 bc
Con Phi + Estrés hídrico	2.72 ± 0.4 ab	2.55 ± 0.1 ab	6.94 ± 0.5 ab
Pr(>F)	0.0007	0.0369	<0.0001

Factor	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	58.43 ± 8.3 a	28.89±21.4a	69.54 ± 19.3 a
Con Phi	47.36 ± 21.8a	21.77±19.4a	46.58 ± 18.9 b
Pr(>F)	0.1294	0.4043	0.0030
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	56.44 ± 21.9a	26.79 ± 14.1 a	45.51 ± 13.3 b
Estrés salino (NaCl)	50.04 ± 20.0a	15.20 ± 7.2 a	57.99 ± 21.4 ab
Estrés hídrico (PEG 6000)	52.20 ± 7.7 a	34.00 ± 30.0 a	70.67 ± 24.5 a
Pr(>F)	0.7512	0.2068	0.0229
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	63.91 ± 4.5 a	26.72 ± 4.9 a	55.99 ± 2.8 ab
Con Phi + sin estrés	48.96 ± 30.9a	26.86 ± 21.0 a	35.03 ± 1 0.7 b
Sin Phi + Estrés salino	60.48 ± 6.6 a	18.57 ± 7.0 a	63.78 ± 9.7 ab
Con Phi + Estrés salino	39.60 ± 24.4a	11.84 ± 6.5 a	52.21 ± 29.7 ab
Sin Phi + Estrés hídrico	50.91 ± 8.3 a	41.39 ± 35.3 a	88.85 ± 21.7 a
Con Phi + Estrés hídrico	53.50 ± 8.1 a	26.61 ± 26.5 a	52.49 ± 6.9 ab
Pr(>F)	0.4295	0.4779	0.0065
Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Na (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	217.45 ± 42.3a	7.88 ± 3.0 a	7486.01±11024.1a
Con Phi	152.83 ± 60.1b	7.20 ± 0.5 a	3862.74±5211.3b
Pr(>F)	0.0040	0.4292	0.0073
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	180.42 ± 73.3a	7.65±1.6a	395.70 ± 76.7 b
Estrés salino (NaCl)	162.43±65.8a	8.52±2.7a	16189.00 ± 7439.8 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	212.56±30.2a	6.45±1.5a	438.31 ± 124.5 b
Pr(>F)	0.1360	0.1556	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	237.65 ± 53.0 a	8.16 ± 2.3 a	382.71±67.07c
Con Phi + sin estrés	123.19 ± 31. 2b	7.15 ± 0.4 a	408.70±93.74c
Sin Phi + Estrés salino	185.51 ± 38.5 ab	9.47 ± 3.9 a	21577±6961.36a
Con Phi + Estrés salino	139.35 ± 84.8 ab	7.56 ± 0.3 a	10801±1811.37b
Sin Phi + Estrés hídrico	229.18 ± 13.7 ab	6.00 ± 2.0 a	498.34±155.65c
Con Phi + Estrés hídrico	195.94 ± 34.7 ab	6.90 ± 0.6 a	378.28±48.08c
Pr(>F)	0.0173	0.2877	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.



**Cuadro 1. 9.** Concentración de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> en raíces de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	13.07±2.9a	3.77±0.9a	13.14±6.1b
Con Phi	11.14±3.5b	3.50±0.9b	14.13±6.2a
Pr(>F)	0.0151	0.0006	0.0085
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	14.53±1.1a	3.74±0.3b	20.10±1.4a
Estrés salino (NaCl)	13.34±2.8a	4.58±0.3a	5.90±0.6c
Estrés hídrico (PEG 6000)	8.44±1.8b	2.58±0.2c	14.90±0.5b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	14.70±1.5a	3.64±0.3c	19.42±1.5a
Con Phi + sin estrés	14.35±0.9a	3.83±0.2c	20.78±1.2a
Sin Phi + Estrés salino	14.96±0.8a	4.88±0.1a	5.37±0.2c
Con Phi + Estrés salino	11.73±3.2ab	4.28±0.1b	6.43±0.0c
Sin Phi + Estrés hídrico	9.54±1.9bc	2.78±0.1d	14.63±0.5b
Con Phi + Estrés hídrico	7.35±1.0c	2.37±0.1e	15.17±0.3b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	2.33±0.4a	1.83±0.5a	6.80±1.6a
Con Phi	2.06±0.6b	1.65±0.3b	6.75±1.0a
Pr(>F)	0.0013	0.0047	0.7913
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	2.76±0.3a	2.08±0.3a	8.46±0.8a
Estrés salino (NaCl)	2.04±0.4b	1.21±0.0b	5.68±0.4b
Estrés hídrico (PEG 6000)	1.80±0.1c	1.92±0.1a	6.18±0.2b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	2.67±0.3ab	2.26±0.3a	8.90±0.8a
Con Phi + sin estrés	2.84±0.3a	1.90±0.1b	8.03±0.5a
Sin Phi + Estrés salino	2.43±0.1b	1.21±0.0c	5.40±0.1b
Con Phi + Estrés salino	1.65±0.1c	1.20±0.0c	5.96±0.3b
Sin Phi + Estrés hídrico	1.89±0.1c	2.01±0.2ab	6.10±0.1b
Con Phi + Estrés hídrico	1.70±0.0c	1.84±0.0b	6.26±0.1b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Factor	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	1365.40±1006.3	75.42±11.4a	64.90±8.6a
Con Phi	948.56±470.1b	55.92±16.8b	59.78±9.6b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0424
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	973.60±303.5b	74.56±9.2a	70.42±6.7a
Estrés salino (NaCl)	2000.99±777.2a	66.35±19.0ab	58.10±1.6b
Estrés hídrico (PEG 6000)	496.36±200.4c	56.10±18.2b	58.51±11.0b
Pr(>F)	<0.0001	0.0051	0.0005
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	711.56±110.2c	73.31±12.3a	69.66±8.9ab
Con Phi + sin estrés	1235.63±140.4b	75.82±6.5a	71.16±5.0a
Sin Phi + Estrés salino	2715.35±202.8a	81.55±10.0a	57.98±1.6bc
Con Phi + Estrés salino	1286.62±85.8b	51.15±11.3bc	58.22±1.9bc
Sin Phi + Estrés hídrico	669.28±118.0c	71.40±12.2ab	67.07±9.3ab
Con Phi + Estrés hídrico	323.43±5.7d	40.80±2.2c	49.96±1.3c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0003
Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Na (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	1433.43±251.6b	13.51±3.5a	17065±23542.7b
Con Phi	1686.49±653.8a	14.32±2.9a	17993±25391.3a
Pr(>F)	0.0140	0.1259	0.0090
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	1842.86±435.0a	16.25±1.9a	810.96±80.8b
Estrés salino (NaCl)	1763.55±357.9a	15.46±1.1a	50643±2219.0a
Estrés hídrico (PEG 6000)	1073.47±315.2b	10.03±1.4b	1133.47±315.0b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	1524.07±308.2b	15.14±2.0a	868.15±71.9c
Con Phi + sin estrés	2161.65±274.9a	17.35±1.1a	753.76±36.8c
Sin Phi + Estrés salino	1464.46±157.9b	16.19±1.1a	48921±1574.1b
Con Phi + Estrés salino	2062.64±188.1a	14.74±0.7a	52365±1050.4a
Sin Phi + Estrés hídrico	1311.76±283.1b	9.20±0.9b	1406.43±178.0c
Con Phi + Estrés hídrico	835.18±16.6c	10.87±1.3b	860.50±34.4c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

### 1.6.3. Concentraciones nutrimentales y de Na en el cv. MotzMex 92-207

En el cv. MotzMex 92-207, el aporte de Phi, redujo la concentración foliar de N, B y Na en 12, 17.3 y 30.9% e incrementó la concentración de P, K, S y Mn en 8.3, 7.1, 5.2 y 9.3%, en comparación con plantas sin tratamiento con Phi (**Cuadro 1.10**).

En el **Cuadro 1.10** se observa que el estrés por salinidad redujo en el cv. MotzMex 92-207 en forma significativa la concentración foliar de N, P, K, Ca, S y Cu en 19, 36.3, 12.4, 31.7, 41.5 y 38.5%, respectivamente e incrementó la concentración foliar de Mg, Mn, B y Na en 10.3, 34.3, 38.9 y 1713%; mientras que, el déficit hídrico redujo de forma significativa la concentración foliar de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn y Mn en 30.5, 18.1, 14.6, 13.2, 6.2, 14.8, 9 y 14.1% e incrementó la concentración de B en 56.9%.

La adición de Phi en condiciones en ausencia de salinidad redujo significativamente la concentración foliar de Ca, Mg y S en 10.7, 11.1 y 7.8% e incrementó la de P en 9.1%. En condiciones de estrés salino, el Phi redujo la concentración foliar de B y Na en 14.5 y 32%, respectivamente; mientras que, en condiciones por déficit hídrico el Phi incrementó la concentración foliar de P, K, Mg y S en 14.7, 19, 26.3 y 28.7% y redujo la de B en 29.8% (**Cuadro 1.10**).

Se observa que el aporte de Phi como bioestimulante en el cv. MotzMex 92-207, redujo de manera significativa la concentración en tallos de Fe en 17.3% e incrementó la concentración de N, P, K, Zn, Mn en 13.5, 5.8, 7.5, 23.0 y 10.1% (**Cuadro 1.11**).

En tallos del cv. MotzMex 92-207, se observa que el estrés por salinidad redujo de forma significativa la concentración de P, K, Ca, Mg, S y Zn en 25.33, 28.97, 43.30, 30.26, 56.11 y 20.00% e incrementó en 3153.02% la concentración de Na, el déficit hídrico redujo de forma significativa la concentración de N, P, K, Ca, Mg, S y Mn en un 29.3, 27.2, 21.8, 23.8, 23.3, 15.8 y 11%, respectivamente e incrementó en casi 33% la concentración de Fe (**Cuadro 1.11**).

La adición de Phi en ausencia de estrés incrementó la concentración de P y Mn en 15.6 y 31%, respectivamente en tallos del cv. MotzMex 92-207. En situación de estrés salino,

el Phi redujo en 28.8% la concentración de Na en tallos y bajo déficit hídrico se incrementó en tallos la concentración de K en 15.6% (**Cuadro 1.11**).

En raíces de plantas del cv. MotzMex 92-207 se observa que el aporte de Phi como bioestimulante incrementó de manera significativa la concentración de N y Mn en un 22.8 y un 23.8% (**Cuadro 1.12**).

Se observa que el estrés salino redujo en plantas del cv. MotzMex 92-207 de manera significativa la concentración en raíces de P, K, Ca, Mg, S y Cu en 17.5, 68.7, 35.2, 52.8, 30.8 y 32.4%, respectivamente; e incrementó la concentración en raíces de Fe y Na en 176.1 y 5092.3%. Por otro lado, el estrés hídrico redujo la concentración en raíces de N, P, K, Ca, Mg y Zn en 36.1, 39.9, 19.6, 26.3, 25.6 y 11.3% (**Cuadro 1.12**).

La adición de Phi en ausencia de estrés incrementó la concentración en raíces de P y B en un 14.7 y 35.2%; mientras que, en condiciones de estrés hídrico aumentó significativamente la concentración de Mn en 122.1% (**Cuadro 1.12**).

**Cuadro 1. 10.** Concentración de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	25.35 ± 3.3 a	3.62±0.8b	11.72±1.5b
Con Phi	22.31±4.5b	3.92±0.9a	12.55±1.1a
Pr(>F)	0.0434	<0.0001	0.0057
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	26.78±4.4a	4.85±0.3a	13.51±0.6a
Estrés salino (NaCl)	21.70±4.3b	3.09±0.1c	11.83±0.7b
Estrés hídrico (PEG 6000)	23.01±2.0ab	3.37±0.3b	11.06±1.2b
Pr(>F)	0.0221	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	29.14±1.1a	4.64±0.1b	13.32±0.3ab
Con Phi + sin estrés	24.41±5.4ab	5.06±0.2a	13.70±0.8a
Sin Phi + Estrés salino	23.80±1.6ab	3.07±0.1d	11.72±0.9c
Con Phi + Estrés salino	19.60±5.3b	3.11±0.2d	11.94±0.6bc
Sin Phi + Estrés hídrico	23.10±2.6ab	3.14±0.1d	10.10±0.3d
Con Phi + Estrés hídrico	22.93±1.5ab	3.60±0.2c	12.02±0.8bc
Pr(>F)	0.0284	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	3.39±0.7a	1.99±0.3a	2.51±0.6b
Con Phi	3.32±0.5a	2.05±0.2a	2.64±0.7a
Pr(>F)	0.3078	0.1749	0.0082
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	3.97±0.3a	2.04±0.1b	3.06±0.2a
Estrés salino (NaCl)	2.71±0.1c	2.25±0.1a	1.79±0.1c
Estrés hídrico (PEG 6000)	3.39±0.2b	1.77±0.2c	2.87±0.4b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	4.19±0.2a	2.16±0.1ab	3.19±0.1a
Con Phi + sin estrés	3.74±0.1b	1.92±0.0c	2.94±0.1b
Sin Phi + Estrés salino	2.71±0.1d	2.25±0.1a	1.82±0.1d
Con Phi + Estrés salino	2.70±0.2d	2.25±0.1a	1.75±0.1d
Sin Phi + Estrés hídrico	3.27±0.2c	1.56±0.1d	2.51±0.1c
Con Phi + Estrés hídrico	3.52±0.2bc	1.97±0.2bc	3.23±0.2a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Factor	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	75.59±15.3a	11.72±2.4a	29.85±6.6a
Con Phi	73.18±10.0a	11.93±2.5a	32.98±8.2a
Pr(>F)	0.5982	0.4920	0.2721
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	76.35±6.3ab	14.38±0.9a	35.65±6.8a
Estrés salino (NaCl)	64.18±7.9b	8.84±0.4c	26.15±4.8ab
Estrés hídrico (PEG 6000)	82.62±15.1a	12.25±0.7b	32.44±7.7b
Pr(>F)	0.0113	<0.0001	0.0342
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	76.51±7.4a	14.41±1.0a	33.43±7.8a
Con Phi + sin estrés	76.19±6.0a	14.36±1.0a	37.88±5.8a
Sin Phi + Estrés salino	63.79±2.0a	8.89±0.3c	25.79±1.0a
Con Phi + Estrés salino	64.57±11.9a	8.78±0.6c	26.51±7.2a
Sin Phi + Estrés hídrico	86.46±21.2a	11.86±0.5b	30.34±7.7a
Con Phi + Estrés hídrico	78.78±6.2a	12.65±0.8b	34.54±8.1a
Pr(>F)	0.0673	<0.0001	0.1320
Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Na (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	621.47±157.4b	23.30±8.8a	2252.19±2995.8a
Con Phi	679.52±123.8a	19.27±7.2b	1556.86±1953.9b
Pr(>F)	0.0250	0.0002	0.0269
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	609.45±56.6b	12.88±1.5c	284.38±63.6b
Estrés salino (NaCl)	818.60±75.9a	30.77±3.7a	5156.19±1544.7a
Estrés hídrico (PEG 6000)	523.44±65.3c	20.21±4.0b	273.00±34.1b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	561.74±30.7bc	12.98±1.6c	335.26±26.1c
Con Phi + sin estrés	657.15±21.7b	12.79±1.7c	233.49±43.0c
Sin Phi + Estrés salino	820.42±76.0a	33.18±2.7a	6138.42±1642.6a
Con Phi + Estrés salino	816.78±87.5a	28.36±2.9b	4173.96±544.5b
Sin Phi + Estrés hídrico	482.25±27.4c	23.75±0.6b	282.88±31.9c
Con Phi + Estrés hídrico	564.63±68.4bc	16.67±2.1c	263.13±37.8c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

**Cuadro 1. 11.** Concentración de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> en tallos de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	16.54±4.0b	4.81±0.6b	23.24±3.9b
Con Phi	18.78±3.4a	5.09±1.0a	24.99±4.0a
Pr(>F)	0.0089	0.0008	0.0024
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	18.94±2.4a	6.00±0.5a	29.03±1.4a
Estrés salino (NaCl)	20.65±2.2a	4.48±0.2b	20.62±0.9c
Estrés hídrico (PEG 6000)	13.39±2.3b	4.37±0.2b	22.69±2.2b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	17.15±1.8ab	5.57±0.2b	28.36±0.9a
Con Phi + sin estrés	20.74±1.1a	6.44±0.2a	29.71±1.5a
Sin Phi + Estrés salino	20.65±1.6a	4.44±0.1c	20.31±1.1c
Con Phi + Estrés salino	20.65±2.9a	4.52±0.2c	20.93±0.6c
Sin Phi + Estrés hídrico	11.81±1.2c	4.42±0.2c	21.05±1.4c
Con Phi + Estrés hídrico	14.96±2.0bc	4.32±0.2c	24.34±1.5b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	2.00±0.6a	2.86±0.5a	5.25±1.8a
Con Phi	2.05±0.6a	2.83±0.5a	5.46±1.9a
Pr(>F)	0.7542	0.6528	0.4391
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	2.61±0.1a	3.47±0.2a	7.04±0.4a
Estrés salino (NaCl)	1.48±0.1c	2.42±0.1c	3.09±0.2c
Estrés hídrico (PEG 6000)	1.99±0.6b	2.66±0.1b	5.93±1.1b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	2.58±0.2a	3.52±0.1a	7.17±0.2a
Con Phi + sin estrés	2.64±0.1a	3.41±0.2a	6.91±0.4ab
Sin Phi + Estrés salino	1.50±0.1b	2.41±0.1b	3.13±0.2c
Con Phi + Estrés salino	1.47±0.1b	2.44±0.1b	3.06±0.2c
Sin Phi + Estrés hídrico	1.93±0.6ab	2.66±0.1b	5.45±0.6b
Con Phi + Estrés hídrico	2.05±0.7ab	2.66±0.2b	6.41±1.4ab
Pr(>F)	0.0009	<0.0001	<0.0001

Factor	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	58.87±14.6a	34.29±13.8a	80.19±11.3b
Con Phi	48.68±8.5b	31.71±9.5a	98.64±22.0a
Pr(>F)	0.0157	0.6203	0.0095
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	48.93±6.0b	37.43±8.9a	100.04±14.5a
Estrés salino (NaCl)	47.32±10.9b	31.66±17.7a	80.03±16.0b
Estrés hídrico (PEG 6000)	65.07±12.8a	29.91±4.1a	88.18±23.6ab
Pr(>F)	0.0021	0.4691	0.0583
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	53.48±3.4ab	39.11±12.6a	92.10±4.4a
Con Phi + sin estrés	44.38±4.2ab	35.75±4.4a	107.98±17.3ab
Sin Phi + Estrés salino	51.28±13.8ab	32.64±22.0a	76.97±6.5ab
Con Phi + Estrés salino	43.36±6.6b	30.67±15.6a	83.08±23.0ab
Sin Phi + Estrés hídrico	71.84±15.6a	31.11±2.4a	71.49±10.3b
Con Phi + Estrés hídrico	58.30±4.1ab	28.70±5.4a	104.88±21.3ab
Pr(>F)	0.0047	0.8630	0.0186
Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Na (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	317.15±34.7b	7.40±1.2a	5309.08±7509.7a
Con Phi	349.24±40.6a	7.61±1.1a	3821.12±5156.6a
Pr(>F)	0.0069	0.6730	0.0587
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	344.40±55.9a	7.82±1.2a	395.97±89.9b
Estrés salino (NaCl)	348.50±24.7a	7.04±1.2a	12881±3705.9a
Estrés hídrico (PEG 6000)	306.68±20.7b	7.66±1.1a	417.96±44.5b
Pr(>F)	0.0080	0.4173	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	298.18±27.6b	7.60±0.6a	465.67±74.4c
Con Phi + sin estrés	390.62±28.6a	8.04±1.7a	326.26±19.1c
Sin Phi + Estrés salino	347.02±35.9ab	6.74±1.5a	15045±4147.6a
Con Phi + Estrés salino	349.97±11.1ab	7.34±0.8a	10718±1536.1b
Sin Phi + Estrés hídrico	306.24±22.9b	7.86±1.4a	416.57±20.1c
Con Phi + Estrés hídrico	307.13±21.7b	7.47±1.0a	419.57±64.9c
Pr(>F)	0.0005	0.7310	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.



**Cuadro 1. 12.** Concentración de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> en raíces de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	11.55±4.2b	3.28±0.5a	12.88±5.6a
Con Phi	14.18±2.8a	3.21±0.9a	13.04±5.7a
Pr(>F)	0.0389	0.4829	0.6699
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	15.62±3.5a	4.01±0.4a	18.36±1.4a
Estrés salino (NaCl)	12.99±3.6ab	3.31±0.3b	5.75±0.4c
Estrés hídrico (PEG 6000)	9.98±1.6b	2.41±0.3c	14.76±0.8b
Pr(>F)	0.0039	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	14.44±4.6ab	3.74±0.3b	17.78±1.6a
Con Phi + sin estrés	16.80±1.7a	4.29±0.2a	18.93±1.1a
Sin Phi + Estrés salino	11.29±4.7ab	3.49±0.3bc	5.57±0.3c
Con Phi + Estrés salino	14.70±0.9ab	3.13±0.1c	5.94±0.4c
Sin Phi + Estrés hídrico	8.93±1.1b	2.61±0.0d	15.29±0.4b
Con Phi + Estrés hídrico	11.03±1.3ab	2.21±0.3d	14.24±0.7b
Pr(>F)	0.0116	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	2.16±0.6a	1.25±0.5a	5.08±0.9a
Con Phi	2.18±0.5a	1.34±0.4a	5.09±1.2a
Pr(>F)	0.8788	0.1767	0.9685
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	2.73±0.3a	1.76±0.2a	5.75±0.6a
Estrés salino (NaCl)	1.77±0.2b	0.83±0.1c	3.98±0.3b
Estrés hídrico (PEG 6000)	2.01±0.4b	1.31±0.2b	5.54±1.1a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0003
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	2.87±0.3a	1.81±0.2a	5.98±0.6a
Con Phi + sin estrés	2.59±0.2ab	1.71±0.1ab	5.51±0.5ab
Sin Phi + Estrés salino	1.66±0.2c	0.78±0.1e	4.01±0.1b
Con Phi + Estrés salino	1.89±0.2bc	0.87±0.1de	3.94±0.4b
Sin Phi + Estrés hídrico	1.96±0.1bc	1.17±0.0cd	5.25±0.1ab
Con Phi + Estrés hídrico	2.06±0.7bc	1.45±0.3bc	5.83±1.6a
Pr(>F)	0.0004	<0.0001	0.0030

Factor	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	584.35±320.9a	54.45±14.7a	63.32±12.1a
Con Phi	551.55±341.3a	60.71±18.1a	69.43±13.9a
Pr(>F)	0.5410	0.1923	0.1554
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	356.93±47.5b	63.52±8.8a	75.58±8.9a
Estrés salino (NaCl)	985.57±176.7a	42.97±8.8b	56.50±9.9ab
Estrés hídrico (PEG 6000)	361.35±115.0b	66.25±19.0a	67.04±13.4b
Pr(>F)	<0.0001	0.0011	0.0051
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	337.45±31.4b	64.10±8.7ab	74.77±8.4a
Con Phi + sin estrés	376.41±57.2b	62.94±10.2ab	76.39±10.5a
Sin Phi + Estrés salino	1000.48±154.9a	45.47±9.6ab	57.20±10.3a
Con Phi + Estrés salino	970.66±219.8a	40.46±8.3b	55.81±11.1a
Sin Phi + Estrés hídrico	415.12±46.4b	53.78±19.7ab	57.99±9.9a
Con Phi + Estrés hídrico	307.59±144.8b	78.72±6.3a	76.08±10.1a
Pr(>F)	<0.0001	0.0018	0.0107
Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Na (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	1394.87±625.9b	16.33±2.7a	14349±19791.8a
Con Phi	1727.43±416.5a	17.30±2.3a	14430±20215.1a
Pr(>F)	0.0254	0.1888	0.8872
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	1683.23±358.7a	16.87±3.2ab	797.72±89.4b
Estrés salino (NaCl)	1564.06±430.5a	15.47±2.0b	41420±2263.0a
Estrés hídrico (PEG 6000)	1436.17±625.9a	18.10±1.5a	951.47±293.1b
Pr(>F)	0.3565	0.0260	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	1891.25±280.2a	14.35±1.0b	767.03±48.4b
Con Phi + sin estrés	1475.22±326.1a	19.40±2.4a	828.41±117.4b
Sin Phi + Estrés salino	1401.67±339.9a	15.48±2.8ab	41060±3021.9a
Con Phi + Estrés salino	1726.45±496.6a	15.46±1.2ab	41779±1572.6a
Sin Phi + Estrés hídrico	891.70±104.0b	19.15±0.9a	1218.91±95.8b
Con Phi + Estrés hídrico	1980.63±335.7a	17.05±1.2ab	684.04±24.4b
Pr(>F)	0.0026	0.0026	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

#### **1.6.4. Concentraciones nutrimentales y de Na en el cv. COLPOSCTMex 05-204**

La aplicación de Phi como bioestimulante en el cv. COLPOS CTMex 05-204 no afectó las concentraciones foliares de nutrimentos y de sodio (**Cuadro 1.13**).

Por otra parte, en este cultivar se observa que el estrés salino redujo de manera significativa la concentración foliar de P, Ca, S, Cu y Mn en un 25.5, 31.4, 37, 16.2 y 23.6% e incrementó la concentración foliar de Mg, B y Na en un 19.8, 46.5 y 1727.5%; mientras que, el estrés hídrico redujo la concentración foliar de N, P, K, S y Zn en 25.1, 23.2, 15.1, 19.3 y 17.5 e incrementó la concentración de B en 49.4% (**Cuadro 1.13**).

En el cv. COLPOS CTMex 05-204 la adición de Phi en ausencia de factores de estrés redujo la concentración foliar de K en un 11.9% y en condiciones de estrés por salinidad incrementó la concentración de Na en 34% (**Cuadro 1.13**).

Se observa que el aporte de Phi como bioestimulante redujo de manera significativa la concentración de B en 17.9% en tallos del cv. COLPOS CTMex 05-204 (**Cuadro 1.14**). Asimismo, en tallos de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 se observa que, el estrés salino redujo de manera significativa la concentración de P, K, Ca, Mg y S en un 16.6, 29.6, 48.1, 27.5 y 52.3% e incrementó la concentración de Na en 3274.8%; mientras el estrés hídrico redujo la concentración de P, K, Mg, Zn, Mn y B en 28.3, 32.7, 20.2, 30.2, 23.5 y 20.5% (**Cuadro 1.14**).

La adición de Phi en ausencia de estrés redujo la concentración de K en tallos en 14.4% (**Cuadro 1.14**).

En raíces de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 se observa que el aporte de Phi como bioestimulante redujo la concentración de Cu y Na en 32.9 y 11.2% e incrementó la de Mn en 31.6% (**Cuadro 1.15**).

En el cv. COLPOS CTMex 05-204, el estrés salino redujo de manera significativa la concentración en raíces de K, Ca, Mg en un 64.8, 40.8 y 53.7%, respectivamente; e incrementó la concentración en raíces de Fe y Na en 106.5 y 6385.9%; mientras que, el estrés por déficit hídrico redujo la concentración de N, P, K, S, Mn y B en 42, 52.2, 36.8, 25.6, 53.5 y 36.8% (**Cuadro 1.15**).

La adición de Phi en ausencia de estrés incrementó la concentración de Mn en raíces en 65.2% y redujo la de P en 33.2%; mientras que, en condiciones de estrés salino se redujo la concentración de Na en casi 11% (**Cuadro 1.15**).

**Cuadro 1. 13.** Concentración de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	23.54±5.1a	2.82±0.5a	12.24±1.5a
Con Phi	21.03±4.7a	2.83±0.4a	11.83±0.8a
Pr(>F)	0.1668	0.9268	0.1766
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	25.11±3.0a	3.37±0.2a	12.95±1.1a
Estrés salino (NaCl)	22.93±2.2ab	2.51±0.2b	12.16±0.8a
Estrés hídrico (PEG 6000)	18.81±6.5b	2.59±0.2b	11.00±0.6b
Pr(>F)	0.0260	<0.0001	0.0002
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	25.99±4.3a	3.46±0.2a	13.76±0.3a
Con Phi + sin estrés	24.24±0.8ab	3.28±0.3a	12.13±1.1bc
Sin Phi + Estrés salino	23.01±2.8ab	2.47±0.2b	12.40±0.9ab
Con Phi + Estrés salino	22.84±2.0ab	2.54±0.2b	11.91±0.8bc
Sin Phi + Estrés hídrico	21.61±7.4ab	2.52±0.2b	10.55±0.6c
Con Phi + Estrés hídrico	16.01±4.8b	2.66±0.1b	11.45±0.2bc
Pr(>F)	0.0645	<0.0001	0.0002
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	3.38±0.6a	1.65±0.3a	2.53±0.6a
Con Phi	3.36±0.8a	1.62±0.2a	2.60±0.5a
Pr(>F)	0.8786	0.5151	0.3832
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	3.82±0.4a	1.57±0.1b	3.16±0.2a
Estrés salino (NaCl)	2.62±0.5b	1.88±0.2a	1.99±0.2c
Estrés hídrico (PEG 6000)	3.66±0.3a	1.45±0.1b	2.55±0.3b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	3.67±0.3a	1.55±0.1c	3.27±0.1a
Con Phi + sin estrés	3.98±0.4a	1.59±0.1bc	3.06±0.2ab
Sin Phi + Estrés salino	2.72±0.4bc	1.97±0.2a	1.97±0.1d
Con Phi + Estrés salino	2.53±0.7c	1.78±0.1ab	2.00±0.3d
Sin Phi + Estrés hídrico	3.76±0.3a	1.41±0.1c	2.36±0.2cd
Con Phi + Estrés hídrico	3.57±0.3ab	1.48±0.1c	2.75±0.1bc
Pr(>F)	0.0004	<0.0001	<0.0001

<b>Factor</b>	<b>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	74.52±12.7a	14.32±2.5a	26.26±6.1a
Con Phi	72.10±12.0a	14.35±1.9a	24.43±1.7a
Pr(>F)	0.6644	0.9709	0.2281
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	75.50±3.9a	15.57±2.0a	27.74±6.0a
Estrés salino (NaCl)	73.28±19.8a	13.05±2.3b	25.39±3.0ab
Estrés hídrico (PEG 6000)	71.15±8.0a	14.40±1.8ab	22.90±2.6b
Pr(>F)	0.8130	0.0315	0.0471
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	77.27±3.0a	17.14±1.4a	31.04±7.3a
Con Phi + sin estrés	73.74±4.4a	13.99±0.6ab	24.43±1.3ab
Sin Phi + Estrés salino	74.72±20.7a	12.42±1.5b	26.77±3.1ab
Con Phi + Estrés salino	71.85±22.0a	13.68±3.0ab	24.01±2.6ab
Sin Phi + Estrés hídrico	71.58±11.5a	13.41±1.7ab	20.96±2.0b
Con Phi + Estrés hídrico	70.71±4.0a	15.39±1.3ab	24.85±1.4ab
Pr(>F)	0.9832	0.0170	0.0215
<b>Factor</b>	<b>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>B (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Na (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	464.24±106.2a	28.51±7.9a	1699.12±2092.4b
Con Phi	433.71±59.6a	27.72±5.0a	2198.04±2843.7a
Pr(>F)	0.3148	0.6373	0.0322
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	421.40±54.2b	21.31±5.2b	286.03±50.8b
Estrés salino (NaCl)	520.77±75.7a	31.21±3.0a	5227.10±1169.1a
Estrés hídrico (PEG 6000)	404.75±80.3b	31.84±4.7a	332.61±64.4b
Pr(>F)	0.0100	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	439.45±63.5a	18.64±3.4c	314.24±58.5c
Con Phi + sin estrés	403.35±44.1a	23.97±5.8bc	257.83±21.6c
Sin Phi + Estrés salino	553.90±89.7a	32.84±2.2ab	4467.37±848.4b
Con Phi + Estrés salino	487.64±49.0a	29.57±2.9ab	5986.82±964.4a
Sin Phi + Estrés hídrico	399.37±110.1a	34.06±4.3a	315.76±59.5c
Con Phi + Estrés hídrico	410.13±53.2a	29.62±4.5ab	349.46±73.3c
Pr(>F)	0.0456	0.0003	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

**Cuadro 1. 14.** Concentración de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> en tallos de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	13.21±4.2a	3.29±0.7a	21.76±5.8a
Con Phi	14.38±4.2a	3.25±0.4a	21.09±3.1a
Pr(>F)	0.4400	0.7042	0.2747
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	14.26±5.0ab	3.85±0.4a	27.04±2.6a
Estrés salino (NaCl)	16.58±2.9a	3.21±0.3b	19.03±1.3b
Estrés hídrico (PEG 6000)	10.54±1.4b	2.76±0.2c	18.21±2.2b
Pr(>F)	0.0123	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	13.91±5.1a	4.06±0.5a	29.14±1.2a
Con Phi + sin estrés	14.61±5.6a	3.64±0.1ab	24.94±1.7b
Sin Phi + Estrés salino	16.01±3.2a	3.15±0.3bc	19.45±1.3c
Con Phi + Estrés salino	17.15±3.0a	3.26±0.3bc	18.60±1.2c
Sin Phi + Estrés hídrico	9.71±1.0a	2.67±0.2c	16.69±2.2c
Con Phi + Estrés hídrico	11.38±1.2a	2.84±0.2c	19.73±0.3c
Pr(>F)	0.0774	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	2.07±0.7a	2.17±0.4a	3.78±1.4a
Con Phi	1.88±0.7a	2.16±0.4a	3.70±1.3a
Pr(>F)	0.2898	0.9075	0.7692
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	2.37±0.7a	2.58±0.3a	4.88±1.1a
Estrés salino (NaCl)	1.23±0.1b	1.87±0.2b	2.33±0.2b
Estrés hídrico (PEG 6000)	2.32±0.3a	2.06±0.2b	4.02±0.8a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	2.70±0.3a	2.63±0.2a	5.44±0.8a
Con Phi + sin estrés	2.04±0.9abc	2.53±0.3a	4.32±1.1ab
Sin Phi + Estrés salino	1.28±0.1bc	1.94±0.1b	2.41±0.3c
Con Phi + Estrés salino	1.18±0.2c	1.79±0.2b	2.24±0.1c
Sin Phi + Estrés hídrico	2.24±0.3ab	1.95±0.1b	3.51±0.7bc
Con Phi + Estrés hídrico	2.41±0.3a	2.16±0.1ab	4.54±0.6ab
Pr(>F)	0.0004	<0.0001	<0.0001

Factor	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	46.92±19.7a	16.04±3.8a	58.51±15.6a
Con Phi	35.09±14.4a	21.91±11.8a	55.65±13.3a
Pr(>F)	0.1319	0.1503	0.5568
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	39.81±12.7a	18.73±4.6a	64.03±13.0a
Estrés salino (NaCl)	46.24±15.8a	19.73±9.5a	62.55±8.9a
Estrés hídrico (PEG 6000)	36.95±24.3a	18.45±12.5a	44.67±12.4b
Pr(>F)	0.5936	0.9616	0.0063
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	43.50±16.9a	17.22±5.4a	70.33±16.5a
Con Phi + sin estrés	36.12±7.4a	20.25±3.8a	57.73±3.7a
Sin Phi + Estrés salino	54.50±19.5a	16.38±3.5a	60.34±10.5a
Con Phi + Estrés salino	37.98±4.5a	23.07±13.0a	64.76±7.8a
Sin Phi + Estrés hídrico	42.76±25.2a	14.51±2.7a	44.87±8.1a
Con Phi + Estrés hídrico	31.15±25.5a	22.39±17.8a	44.48±17.2a
Pr(>F)	0.5885	0.76	0.0292
Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Na (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	220.63±48.0a	7.87±1.2a	3586.18±5018.0a
Con Phi	211.38±41.7a	6.46±1.6b	4750.35±6616.7a
Pr(>F)	0.5694	0.0087	0.1042
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	245.68±40.6a	7.57±1.0a	348.53±43.9b
Estrés salino (NaCl)	214.27±25.1ab	7.90±1.5a	11762±3265.4a
Estrés hídrico (PEG 6000)	188.06±47.4b	6.02±1.5b	394.17±76.5b
Pr(>F)	0.0285	0.0105	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	264.60±47.1a	8.14±1.0a	366.05±54.4b
Con Phi + sin estrés	226.76±25.9a	6.99±0.7ab	331.02±27.1b
Sin Phi + Estrés salino	202.81±13.5a	8.93±1.3a	10004±3154.1a
Con Phi + Estrés salino	225.73±30.7a	6.88±0.7ab	13520±2586.4a
Sin Phi + Estrés hídrico	194.46±46.4a	6.52±1.6ab	388.55±30.9b
Con Phi + Estrés hídrico	181.66±54.7a	5.51±1.4b	399.80±112.3b
Pr(>F)	0.0879	0.0096	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

**Cuadro 1. 15.** Concentración de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> en raíces de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	15.08±3.8a	2.86±1.3a	15.00±9.1a
Con Phi	16.28±5.2a	2.50±0.6a	12.86±4.3a
Pr(>F)	0.2960	0.1565	0.1934
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	18.11±1.2a	3.37±1.2a	21.05±7.5a
Estrés salino (NaCl)	18.42±4.1a	3.06±0.1a	7.42±0.2c
Estrés hídrico (PEG 6000)	10.50±1.7b	1.61±0.1b	13.31±1.2b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	17.76±0.4a	4.04±1.4a	25.08±9.0a
Con Phi + sin estrés	18.46±1.7a	2.70±0.3bc	17.03±2.5ab
Sin Phi + Estrés salino	17.15±1.9a	3.02±0.1ab	7.27±0.1c
Con Phi + Estrés salino	19.69±5.5a	3.11±0.0ab	7.58±0.2c
Sin Phi + Estrés hídrico	10.33±2.1b	1.51±0.1c	12.65±1.4bc
Con Phi + Estrés hídrico	10.68±1.6b	1.70±0.1c	13.98±0.6bc
Pr(>F)	0.0002	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>S (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	2.06±0.7a	3.61±1.1a	7.16±2.5a
Con Phi	2.00±0.5a	1.67±0.1b	5.95±0.3ab
Pr(>F)	0.7368	3.10±0.6a	5.33±0.7b
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	2.50±0.8a	<0.0001	0.0388
Estrés salino (NaCl)	1.48±0.1b	2.81±1.3a	6.47±2.2a
Estrés hídrico (PEG 6000)	2.10±0.3a	2.78±0.9a	5.83±0.7a
Pr(>F)	0.0011	0.9017	0.2523
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	2.79±0.9a	4.11±1.4a	8.50±2.9a
Con Phi + sin estrés	2.22±0.7ab	3.10±0.6ab	5.82±1.3ab
Sin Phi + Estrés salino	1.50±0.1b	1.66±0.1b	6.13±0.3ab
Con Phi + Estrés salino	1.46±0.1b	1.69±0.1b	5.77±0.3ab
Sin Phi + Estrés hídrico	1.89±0.2ab	2.66±0.4ab	4.77±0.4b
Con Phi + Estrés hídrico	2.31±0.1ab	3.54±0.2a	5.89±0.3ab
Pr(>F)	0.0044	0.0002	0.0218



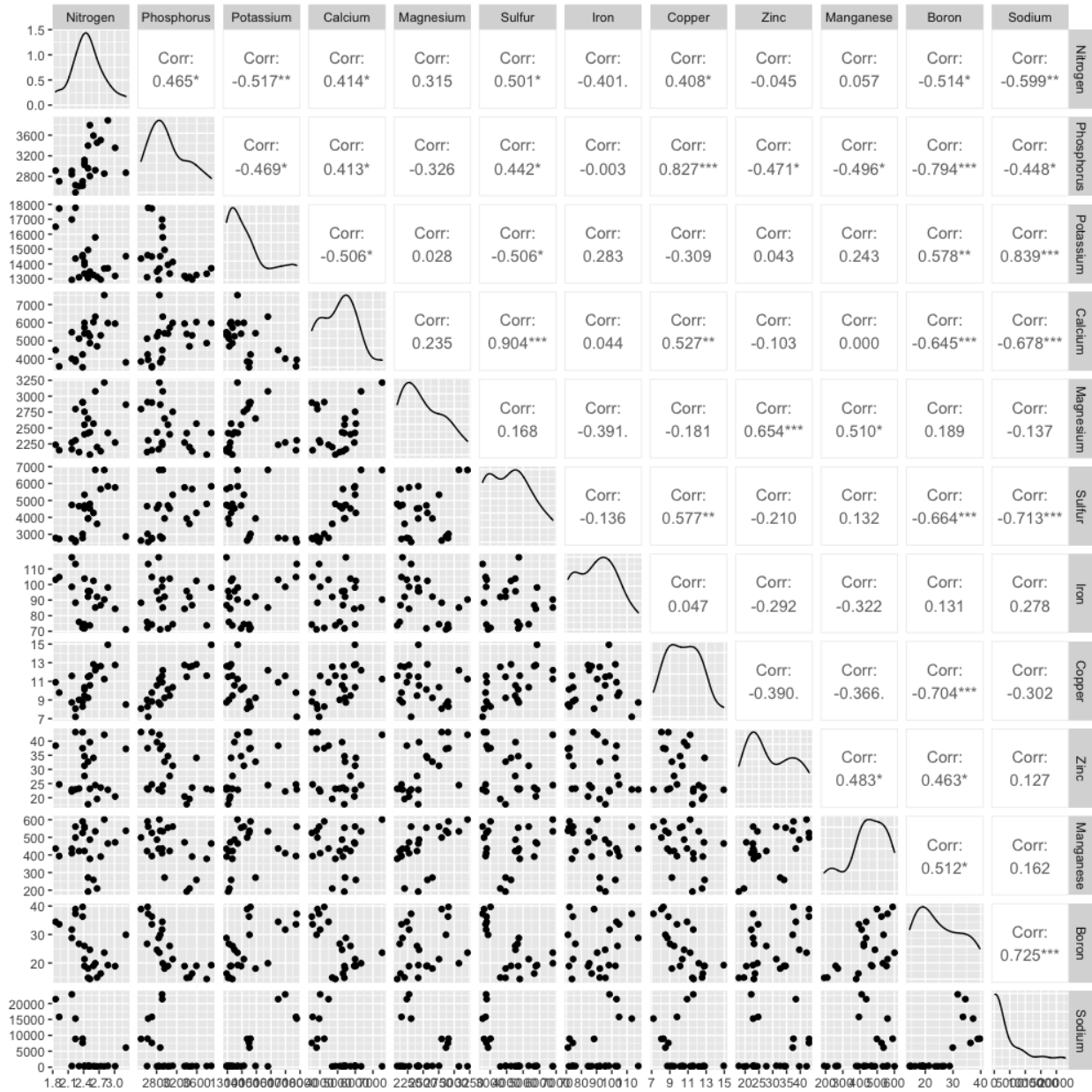
Factor	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	539.81±192.8b	85.37±34.3a	79.48±19.0a
Con Phi	1114.45±220.0a	87.68±50.6a	74.82±13.0a
Pr(>F)	326.95±82.6b	57.74±11.1a	0.4533
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	<0.0001	0.1376	85.21±22.2a
Estrés salino (NaCl)	652.37±408.2a	92.07±46.5a	77.68±11.5a
Estrés hídrico (PEG 6000)	668.43±365.2a	61.80±13.9b	68.55±8.0a
Pr(>F)	0.8172	0.0307	0.1094
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	427.48±120.7b	104.80±35.9a	87.73±26.7a
Con Phi + sin estrés	652.13±196.3b	65.95±21.1a	82.70±20.5a
Sin Phi + Estrés salino	1181.52±151.2a	114.95±62.6a	86.54±6.8a
Con Phi + Estrés salino	1047.37±279.4a	60.42±8.2a	68.82±7.1a
Sin Phi + Estrés hídrico	348.11±97.0b	56.46±11.1a	64.17±9.5a
Con Phi + Estrés hídrico	305.80±73.0b	59.02±12.6a	72.93±3.1a
Pr(>F)	<0.0001	0.0556	0.1737
Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Na (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	1467.51±621.9b	17.05±7.6a	17268±24183.2a
Con Phi	1930.47±807.4a	15.03±2.4a	15332±21570.4b
Pr(>F)	0.0176	0.2519	<0.0001
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	1999.59±805.0a	20.22±8.0a	728.72±178.2b
Estrés salino (NaCl)	2167.14±314.1a	15.12±1.3ab	47264±3127.7a
Estrés hídrico (PEG 6000)	930.24±200.4b	12.78±1.8b	908.53±144.2b
Pr(>F)	<0.0001	0.0069	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	1508.07±433.0b	24.73±9.1a	777.43±255.3c
Con Phi + sin estrés	2491.10±824.8a	15.71±3.6ab	680.00±51.2c
Sin Phi + Estrés salino	2102.49±247.4a	14.52±1.3b	50005±949.4a
Con Phi + Estrés salino	2231.79±397.3a	15.72±1.2ab	44522±1373.9b
Sin Phi + Estrés hídrico	791.96±146.2c	11.90±1.6b	1022.66±114.1c
Con Phi + Estrés hídrico	1068.52±146.0c	13.65±1.8b	794.41±27.8c
Pr(>F)	0.0001	0.0069	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

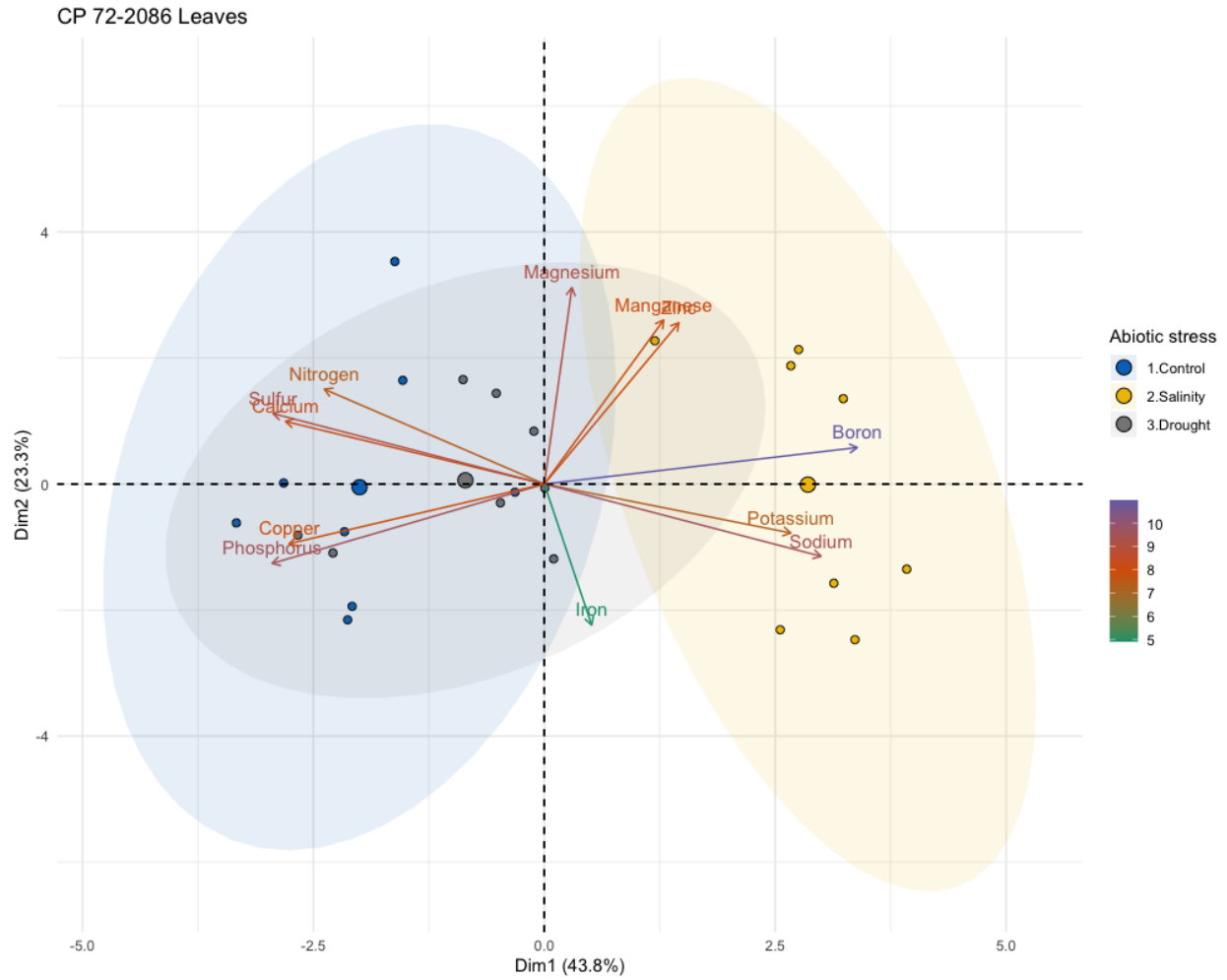
### **1.6.5. Análisis de concentraciones foliares de nutrimentos y de Na<sup>+</sup> con componentes principales**

Se utilizó un análisis de componentes principales (PCA) con los datos de concentraciones foliares de nutrimentos, donde la suma del componente principal 1 y el componente principal 2 (Dim1+Dim2) representó, el 67.1, 77.7 y 62.1% de la varianza total de nutrimentos analizados en hojas de plantas de caña de azúcar de los cultivares CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOSCTMex 05-204 sometidos a estrés abiótico. Así también, se corroboró la correlación entre los nutrimentos para cada cultivar de caña de azúcar y así apreciar el comportamiento de las determinaciones nutrimentales en hojas como respuesta al tratamiento sin estrés, estrés salino y estrés por déficit hídrico (**Figuras 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10 y 1.11.**).

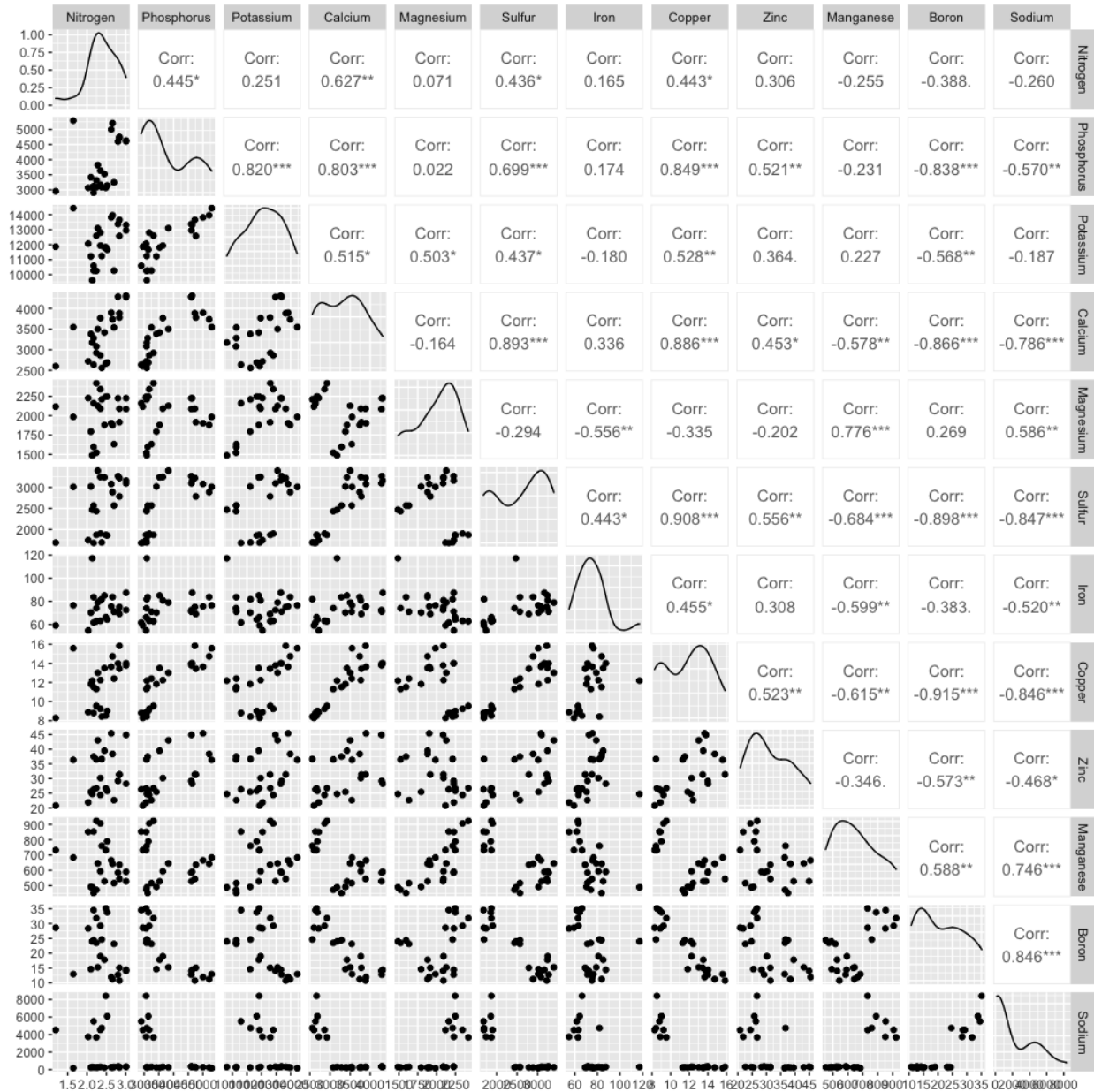
El análisis confirmó una clara categorización en el comportamiento de las concentraciones foliares de nutrimentos en plantas bajo estrés salino con respecto a plantas sin estrés y a plantas con déficit hídrico; esta respuesta se aprecia de manera estadística en los apartados correspondientes a factor estrés en los **Cuadros 1.7, 1.10 y 1.13** y de manera visual en las **Figuras 1.7 1.9 y 1.11.**



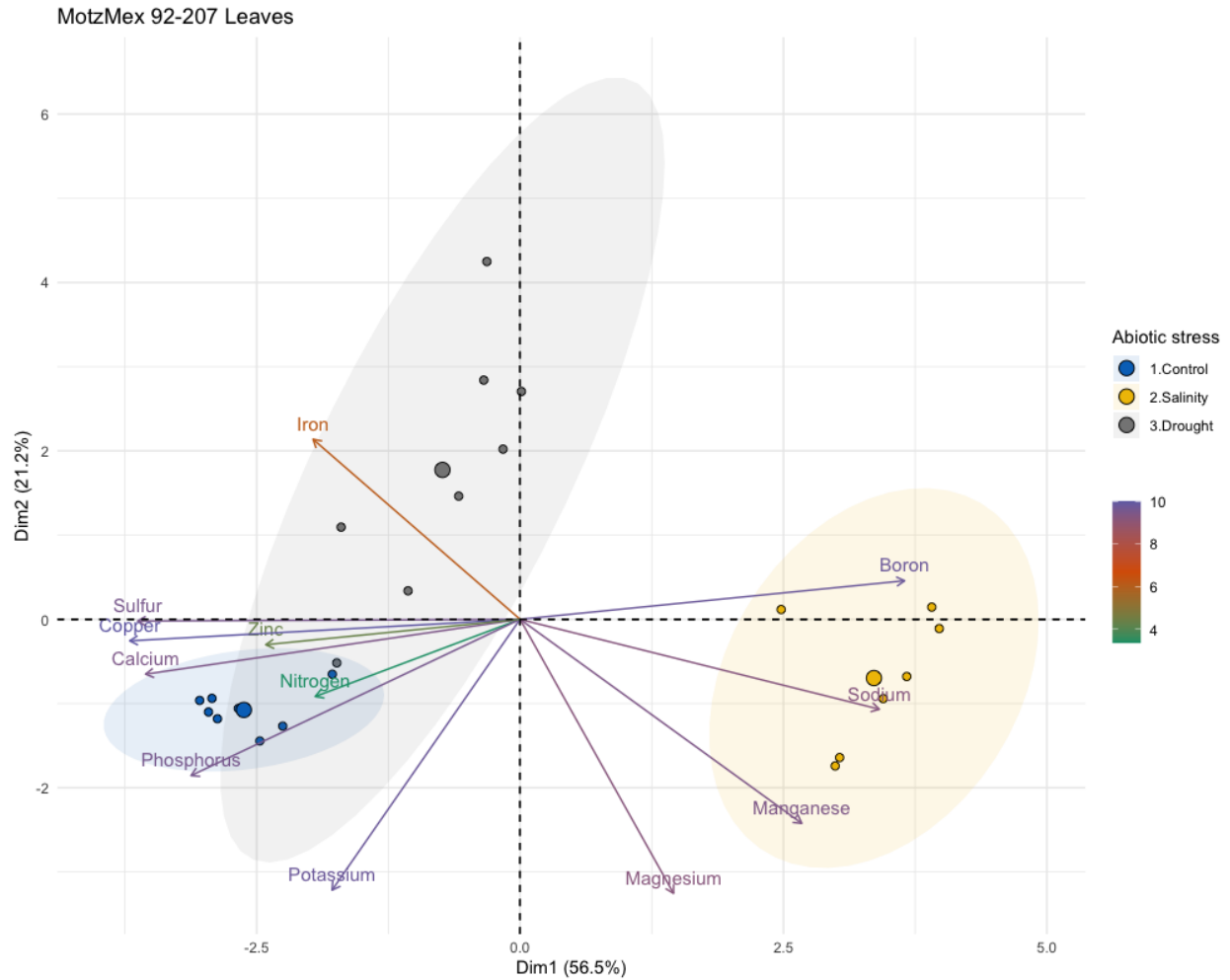
**Figura 1. 6.** Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086. \*\*\* = Significativo a  $P \leq 0.001$ ; \*\* = Significativo a  $P \leq 0.01$ ; \* = Significativo a  $P \leq 0.05$ .



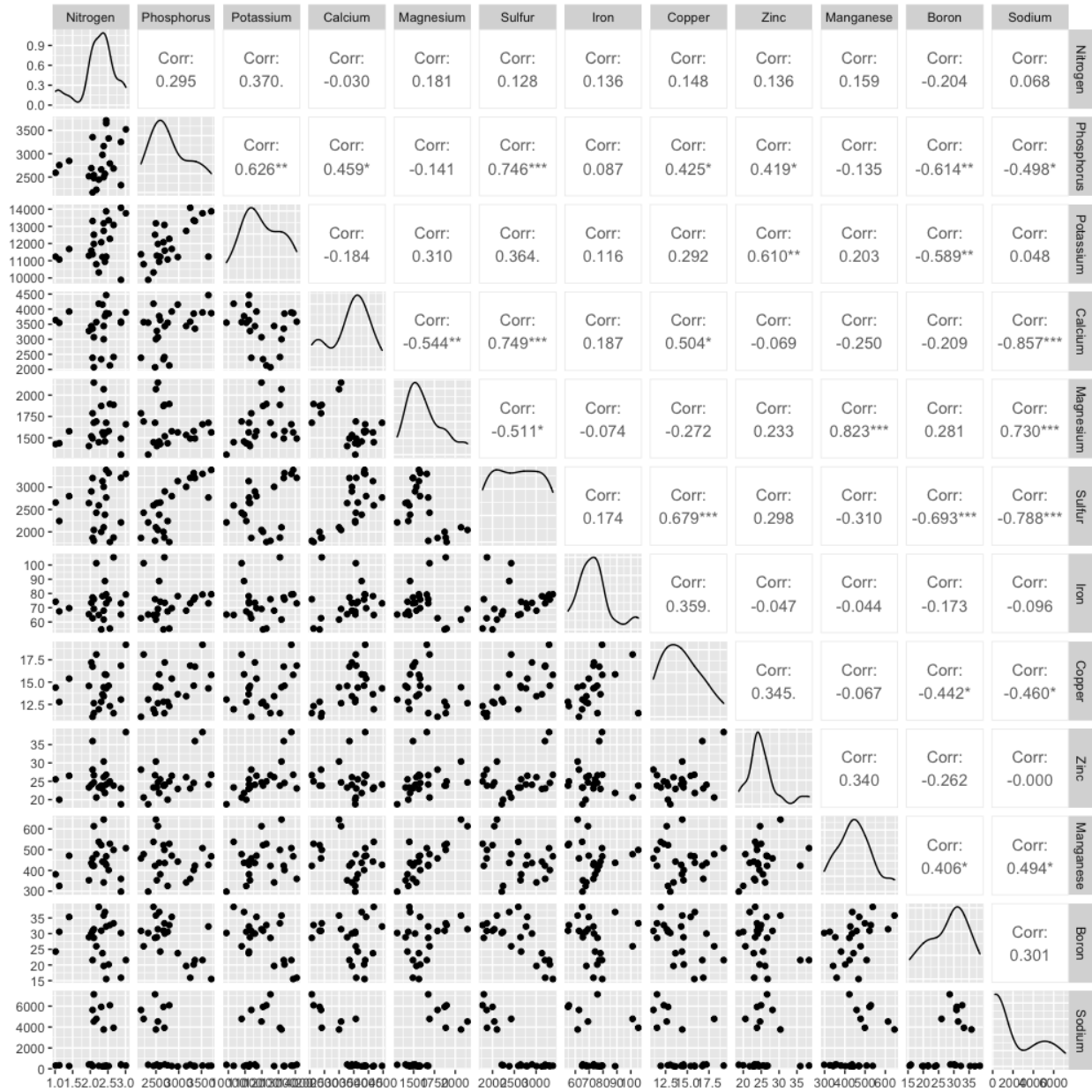
**Figura 1. 7.** Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086.



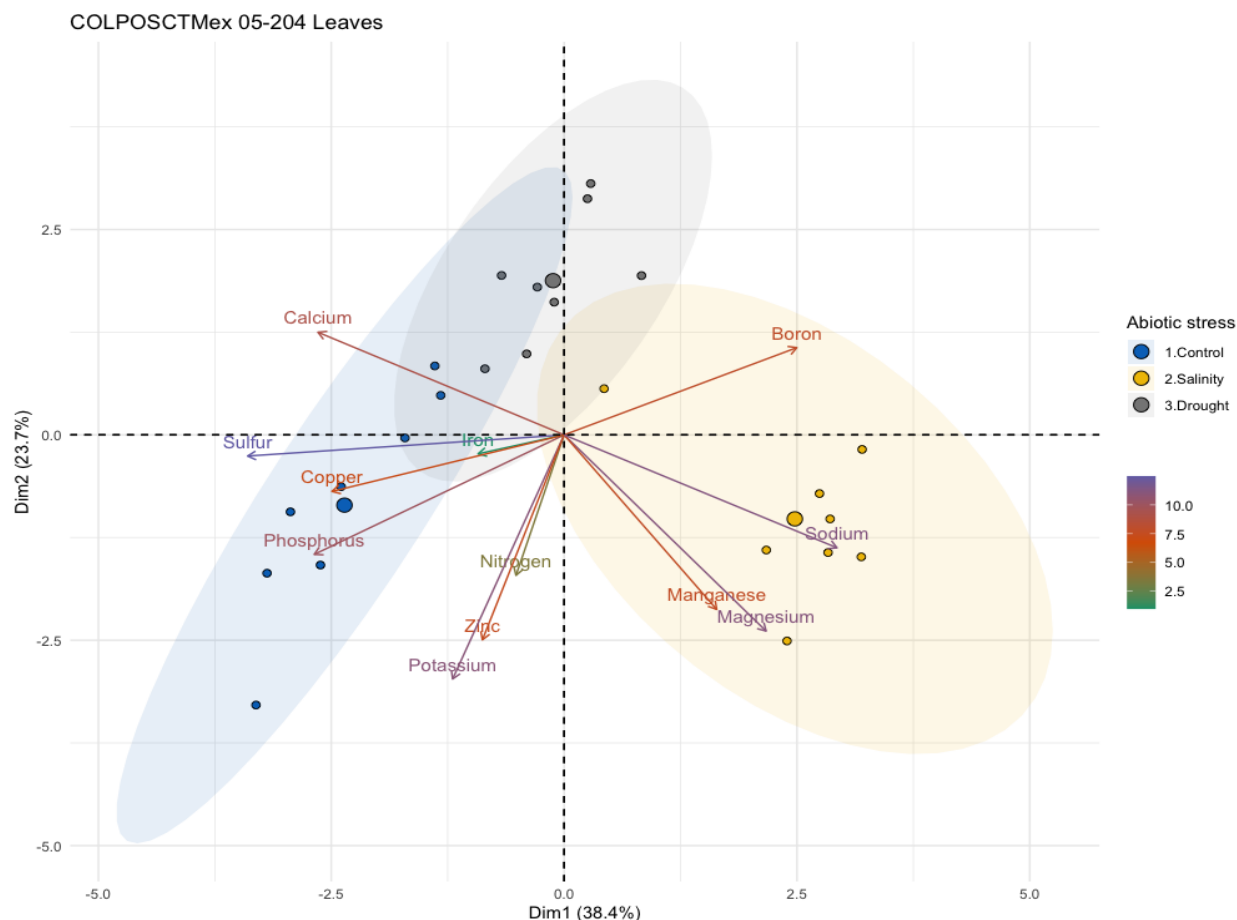
**Figura 1. 8.** Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207. \*\*\* = Significativo a  $P \leq 0.001$ ; \*\* = Significativo a  $P \leq 0.01$ ; \* = Significativo a  $P \leq 0.05$ .



**Figura 1. 9.** Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207.



**Figura 1. 10.** Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) en hojas de caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204. \*\*\* = Significativo a  $P \leq 0.001$ ; \*\* = Significativo a  $P \leq 0.01$ ; \* = Significativo a  $P \leq 0.05$ .



**Figura 1. 11.** Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (salinidad y sequía) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204.

### 1.6.6. Concentración foliar de pigmentos fotosintéticos

El aporte de Phi a la solución nutritiva (**Cuadro 1.16**), incrementó en 12.8, 18, 13.9, 8.7 y 5.2% la concentración foliar de clorofilas *a*, *b* y total (*a+b*), carotenoides y la relación clorofila total/carotenoides en caña de azúcar cv. CP 72 2086.

Se tuvo efecto positivo de la adición de Phi como bioestimulante a la solución nutritiva, incrementando de manera general la concentración de pigmentos fotosintéticos en ausencia de estrés (Sin Phi y Con Phi) y de estrés (NaCl y PEG) en plantas de caña de azúcar. Se distingue un efecto significativo del Phi en el incremento en la concentración foliar de clorofila *a* y clorofila total en 34.2 y 34.8% bajo estrés salino (**Cuadro 1.16**).



El aporte de Phi a la solución nutritiva (**Cuadro 1.17**), incrementó en 8.9% la concentración foliar de carotenoides totales en caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207.

Se observa un efecto positivo por parte de la adición de Phi como bioestimulante a la solución nutritiva, incrementando de manera general la concentración de pigmentos fotosintéticos bajo situación de estrés (NaCl y PEG) en plantas de caña de azúcar. Destaca el efecto significativo en el incremento en 43, 44 y 32% en la concentración de clorofilas *a*, *b* y total, así como de carotenoides, con la adición de Phi bajo situación de estrés por NaCl (**Cuadro 1.17**).

En plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204, el aporte de Phi a la solución nutritiva (**Cuadro 1.18**), incrementó significativamente en un 23.3, 34.9, 25.9 y 16.4% la concentración foliar de clorofila *a*, *b*, total, y de la relación clorofila total/carotenoides.

Se observa un efecto positivo por parte de la adición de Phi como bioestimulante a la solución nutritiva, incrementando de manera general la concentración de pigmentos fotosintéticos en ausencia de estrés y en presencia de él (NaCl y PEG) en plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 (**Figura 1.18**).

Bajo situación de estrés por NaCl y PEG se observó una reducción general en la concentración foliar de pigmentos fotosintéticos (clorofila *a*, clorofila *b*, y clorofila total (*a+b*), carotenoides y la relación clorofila total/carotenoides) en las tres variedades de plantas de caña de azúcar (**Cuadros 1.16, 1.17 y 1.18**); de igual modo, la reducción en la concentración de pigmentos fotosintéticos fue de mayor magnitud en las plantas bajo estrés por NaCl que en las plantas bajo estrés por PEG.

**Cuadro 1. 16.** Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>Clorofila a</b>	<b>Clorofila b</b>	<b>Clorofila total</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	74.28 $\pm$ 14.1 b	20.43 $\pm$ 4.5 b	94.71 $\pm$ 22.9 b
Con Phi	83.78 $\pm$ 18.9 a	24.11 $\pm$ 4.2 a	107.89 $\pm$ 17.5 a
Pr(>F)	0.0041	0.0202	0.0051
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	93.16 $\pm$ 8.3 a	24.40 $\pm$ 4.5 a	117.56 $\pm$ 12.5 a
Estrés salino (NaCl)	59.24 $\pm$ 10.7 b	18.74 $\pm$ 4.5 b	78.98 $\pm$ 15.0 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	84.68 $\pm$ 7.2 a	23.66 $\pm$ 3.0 a	108.34 $\pm$ 9.4 a
Pr(>F)	<0.0001	0.0097	<0.0001
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	89.21 $\pm$ 7.2 a	21.99 $\pm$ 4.2 ab	111.20 $\pm$ 11.3ab
Con Phi + sin estrés	97.12 $\pm$ 8.2 a	26.82 $\pm$ 3.5 a	123.94 $\pm$ 11.3 a
Sin Phi + Estrés salino	50.60 $\pm$ 2.1 c	15.71 $\pm$ 1.2 b	66.31 $\pm$ 1.6 c
Con Phi + Estrés salino	67.89 $\pm$ 8.1 b	21.78 $\pm$ 4.7 ab	89.67 $\pm$ 12.6 b
Sin Phi + Estrés hídrico	83.03 $\pm$ 10.2 ab	23.60 $\pm$ 2.8 ab	106.63 $\pm$ 12.7ab
Con Phi + Estrés hídrico	86.32 $\pm$ 2.9 a	23.72 $\pm$ 3.6 a	110.04 $\pm$ 6.1 ab
Pr(>F)	<0.0001	0.0090	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Carotenos</b>	<b>Clorofila a / Clorofila b</b>	<b>Clorofila total / Carotenos</b>
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	16.29 $\pm$ 3.5 b	3.63 $\pm$ 0.5 a	5.79 $\pm$ 0.3 b
Con Phi	17.71 $\pm$ 2.7 a	3.50 $\pm$ 0.6 a	6.09 $\pm$ 0.3 a
Pr(>F)	0.0128	0.4251	0.0127
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	19.21 $\pm$ 1.6 a	3.89 $\pm$ 0.5 a	6.11 $\pm$ 0.2 a
Estrés salino (NaCl)	13.21 $\pm$ 1.7 b	3.21 $\pm$ 0.3 b	5.87 $\pm$ 0.4 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	18.57 $\pm$ 1.3 a	3.61 $\pm$ 0.4 ab	5.83 $\pm$ 0.2 a
Pr(>F)	<0.0001	0.0074	0.0993
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	18.27 $\pm$ 1.1 a	4.13 $\pm$ 0.5 a	6.08 $\pm$ 0.3 a
Con Phi + sin estrés	20.14 $\pm$ 1.6 a	3.65 $\pm$ 0.3 ab	6.15 $\pm$ 0.1 a
Sin Phi + Estrés salino	11.90 $\pm$ 0.7 b	3.24 $\pm$ 0.3 b	5.58 $\pm$ 0.2 a
Con Phi + Estrés salino	14.52 $\pm$ 1.3 b	3.18 $\pm$ 0.4 b	6.15 $\pm$ 0.4 a
Sin Phi + Estrés hídrico	18.68 $\pm$ 1.9 a	3.52 $\pm$ 0.2 ab	5.71 $\pm$ 0.2 a
Con Phi + Estrés hídrico	18.46 $\pm$ 0.6 a	3.69 $\pm$ 0.5 ab	5.96 $\pm$ 0.2 a
Pr(>F)	<0.0001	0.0258	0.0274

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

**Cuadro 1. 17.** Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en hojas de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

Factor	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	65.82 ± 20.5 a	19.53 ± 4.8 a	85.35 ± 25.1a
Con Phi	71.69 ± 10.9 a	20.97 ± 4.0 a	92.66 ± 13.7a
Pr(>F)	0.1298	0.3350	0.1636
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	85.24 ± 12.8 a	22.41 ± 5.1 a	107.65±17.7a
Estrés salino (NaCl)	58.29 ± 12.2 b	19.57 ± 4.4 a	77.86±16.5b
Estrés hídrico (PEG 6000)	62.75 ± 9.2 b	18.78 ± 3.04 a	81.53±11.9b
Pr(>F)	<0.0001	0.1296	0.0002
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	91.30 ± 9.9 a	24.64 ± 3.9 a	115.94±13.8a
Con Phi + sin estrés	79.18 ± 13.6 ab	20.18 ± 5.7 ab	99.36±18.9ab
Sin Phi + Estrés salino	47.98 ± 6.1 d	15.84 ± 2.6 b	63.82 ± 8.4c
Con Phi + Estrés salino	68.60 ± 5.3 bc	23.30±1.0 ab	91.90 ± 6.2ab
Sin Phi + Estrés hídrico	58.19 ± 6.2 cd	18.12 ± 2.3 ab	76.31 ± 8.3bc
Con Phi + Estrés hídrico	67.31 ± 10.2 bcd	19.45 ± 3.9 ab	86.76±13.7bc
Pr(>F)	<0.0001	0.0258	0.0003
Factor	Carotenos	Clorofila a / Clorofila b	Clorofila total / Carotenos
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	16.40 ± 3.2 b	3.33 ± 0.4 a	5.12 ± 0.5 a
Con Phi	17.86 ± 1.7 a	3.49 ± 0.6 a	5.17 ± 0.4 a
Pr(>F)	0.0193	0.2364	0.7664
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	19.66 ± 1.9 a	3.87 ± 0.4 a	5.45 ± 0.4 a
Estrés salino (NaCl)	15.82 ± 2.5 b	3.00 ± 0.2 b	4.89 ± 0.4 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	15.92 ± 1.3 b	3.36 ± 0.3 b	5.11 ± 0.4 ab
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0240
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	20.40 ± 1.8 a	3.73 ± 0.2 ab	5.68 ± 0.2 a
Con Phi + sin estrés	18.92 ± 1.9 ab	4.02 ± 0.5 a	5.22 ± 0.5 ab
Sin Phi + Estrés salino	13.64 ± 0.9 d	3.05 ± 0.3 bc	4.67 ± 0.4 b
Con Phi + Estrés salino	18.00 ± 1.2 abc	2.94 ± 0.1 c	5.11 ± 0.1 ab
Sin Phi + Estrés hídrico	15.17 ± 0.8 cd	3.22 ± 0.2 bc	5.03 ± 0.4 ab
Con Phi + Estrés hídrico	16.66 ± 1.4 bcd	3.50 ± 0.3 abc	5.18 ± 0.5 ab
Pr(>F)	<0.0001	0.0006	0.0355

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

**Cuadro 1. 18.** Concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en hojas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

Factor	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	58.91 $\pm$ 16.1 b	16.92 $\pm$ 3.9 b	75.83 $\pm$ 19.7 b
Con Phi	72.62 $\pm$ 12.6 a	22.83 $\pm$ 4.7 a	95.45 $\pm$ 16.8 a
Pr(>F)	0.0126	0.0032	0.0077
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	73.86 $\pm$ 15.6 a	21.37 $\pm$ 5.3 a	95.23 $\pm$ 20.4 a
Estrés salino (NaCl)	53.41 $\pm$ 11.2 b	17.43 $\pm$ 4.6 a	70.84 $\pm$ 15.5 b
Estrés hídrico (PEG 6000)	70.03 $\pm$ 13.3 a	20.83 $\pm$ 5.4 a	90.86 $\pm$ 18.6 ab
Pr(>F)	0.0078	0.1625	0.0157
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	66.05 $\pm$ 18.6 ab	17.51 $\pm$ 4.3 ab	83.56 $\pm$ 22.8 ab
Con Phi + sin estrés	81.67 $\pm$ 7.8 a	25.23 $\pm$ 2.8 a	106.90 $\pm$ 9.2 a
Sin Phi + Estrés salino	45.56 $\pm$ 6.2 b	14.93 $\pm$ 2.2 b	60.49 $\pm$ 8.2 b
Con Phi + Estrés salino	61.27 $\pm$ 9.4 ab	19.93 $\pm$ 5.3 ab	81.20 $\pm$ 14.4 ab
Sin Phi + Estrés hídrico	65.13 $\pm$ 14.4 ab	18.33 $\pm$ 4.9 ab	83.46 $\pm$ 19.3 ab
Con Phi + Estrés hídrico	74.93 $\pm$ 11.9 a	23.33 $\pm$ 5.1 ab	98.26 $\pm$ 16.9 a
Pr(>F)	0.0109	0.0298	0.0133
Factor	Carotenos	Clorofila a / Clorofila b	Clorofila total / Carotenos
<b>Bioestimulante</b>			
Sin Phi	14.47 $\pm$ 2.5 a	3.47 $\pm$ 0.4 a	5.19 $\pm$ 0.5 b
Con Phi	15.77 $\pm$ 2.3 a	3.22 $\pm$ 0.3 a	6.04 $\pm$ 0.6 a
Pr(>F)	0.0875	0.0582	0.0014
<b>Estrés</b>			
Sin estrés	16.44 $\pm$ 2.5 a	3.51 $\pm$ 0.4 a	5.75 $\pm$ 0.6 a
Estrés salino (NaCl)	12.73 $\pm$ 1.1 b	3.11 $\pm$ 0.3 b	5.52 $\pm$ 0.8 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	16.18 $\pm$ 1.7 a	3.41 $\pm$ 0.3 ab	5.58 $\pm$ 0.7 a
Pr(>F)	0.0007	0.0402	0.6905
<b>Tratamiento</b>			
Sin Phi + sin estrés	15.11 $\pm$ 2.7 abc	3.76 $\pm$ 0.2 a	5.48 $\pm$ 0.5 a
Con Phi + sin estrés	17.78 $\pm$ 1.4 a	3.26 $\pm$ 0.4 ab	6.03 $\pm$ 0.5 a
Sin Phi + Estrés salino	12.24 $\pm$ 1.1 c	3.06 $\pm$ 0.2 b	4.93 $\pm$ 0.3 a
Con Phi + Estrés salino	13.23 $\pm$ 1.1 bc	3.16 $\pm$ 0.4 ab	6.11 $\pm$ 0.7 a
Sin Phi + Estrés hídrico	16.08 $\pm$ 2.1 abc	3.58 $\pm$ 0.2 ab	5.15 $\pm$ 0.6 a
Con Phi + Estrés hídrico	16.29 $\pm$ 1.6 ab	3.25 $\pm$ 0.2 ab	6.00 $\pm$ 0.5 a
Pr(>F)	0.0029	0.0295	0.0292

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

### 1.6.7. Concentración foliar de aminoácidos

En hojas de plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086, no se observó efecto significativo principal del Phi en la concentración foliar de aminoácidos (**Cuadro 1.19**).

En este mismo cultivar se observó que el estrés salino ocasionó un incremento significativo de 13.4% en la concentración foliar de aminoácidos, respecto a plantas sin ningún tipo de estrés (**Cuadro 1.19**).

**Cuadro 1. 19.** Concentración foliar de aminoácidos libres totales ( $\eta$ M) en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

Factor	Aminoácidos libres totales
<b>Bioestimulante</b>	
Sin Phi	858.12 $\pm$ 117.03 a
Con Phi	849.54 $\pm$ 103.53 a
Pr(>F)	0.8077
<b>Estrés</b>	
Sin estrés	840.26 $\pm$ 87.29 b
Estrés salino (NaCl)	952.56 $\pm$ 34.30 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	768.67 $\pm$ 99.96 b
Pr(>F)	0.0015
<b>Tratamiento</b>	
Sin Phi + sin estrés	837.32 $\pm$ 76.70 ab
Con Phi + sin estrés	843. 19 $\pm$ 108.96 ab
Sin Phi + Estrés salino	962.47 $\pm$ 39.37 a
Con Phi + Estrés salino	942.65 $\pm$ 30.54 ab
Sin Phi + Estrés hídrico	774.57 $\pm$ 135.58 ab
Con Phi + Estrés hídrico	762.76 $\pm$ 69.59 b
Pr(>F)	0.0155

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

El efecto principal de Phi no fue significativo en la concentración foliar de aminoácidos libres totales de plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207. En situación de estrés por NaCl se observó un ligero incremento en la concentración foliar de aminoácidos libres totales en este cultivar; mientras, que en situación de estrés por PEG

se aprecia una reducción significativa en la concentración de aminoácidos libres totales respecto al tratamiento testigo (**Cuadro 1.20**).

**Cuadro 1. 20.** Concentración foliar de aminoácidos libres totales ( $\eta$ M) en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

Factor	Aminoácidos libres totales
<b>Bioestimulante</b>	
Sin Phi	844.44 $\pm$ 191.5 a
Con Phi	878.34 $\pm$ 134.2 a
Pr(>F)	0.1790
<b>Estrés</b>	
Sin estrés	944.90 $\pm$ 69.4 a
Estrés salino (NaCl)	985.32 $\pm$ 49.7 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	654.55 $\pm$ 72.2 b
Pr(>F)	<0.0001
<b>Tratamiento</b>	
Sin Phi + sin estrés	959.01 $\pm$ 81.2 a
Con Phi + sin estrés	930.78 $\pm$ 64.1 a
Sin Phi + Estrés salino	974.42 $\pm$ 70.9 a
Con Phi + Estrés salino	996.22 $\pm$ 20.5 a
Sin Phi + Estrés hídrico	601.07 $\pm$ 62.1 b
Con Phi + Estrés hídrico	708.02 $\pm$ 25.8 b
Pr(>F)	<0.0001

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

En el cv. COLPOS CTMex 05-204 el efecto principal de Phi no fue significativo en la concentración foliar de aminoácidos; mientras que se observó que el estrés salino, incrementó esta variable en 20%, con respecto a plantas sin estrés (**Cuadro 1.21**).

Por otra parte, no se posee evidencia significativa para concluir que el aporte de Phi a la solución nutritiva (**Cuadros 1.19, 1.20 y 1.21**), tenga efecto significativo la concentración foliar de aminoácidos libres totales contenidos en los tres cultivares de caña de azúcar evaluados de plantas de caña de azúcar, bajo situación de estrés salino e hídrico.

**Cuadro 1. 21.** Concentración foliar de aminoácidos libres totales ( $\eta$ M) en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con Phi y sometidas a factores de estrés.

<b>Factor</b>	<b>Aminoácidos libres totales</b>
<b>Bioestimulante</b>	
Sin Phi	816.10 $\pm$ 117.3 a
Con Phi	818.81 $\pm$ 120.8 a
Pr(>F)	0.9361
<b>Estrés</b>	
Sin estrés	779.84 $\pm$ 117.3 b
Estrés salino (NaCl)	936.05 $\pm$ 51.7 a
Estrés hídrico (PEG 6000)	736.47 $\pm$ 54.2 b
Pr(>F)	0.0003
<b>Tratamiento</b>	
Sin Phi + sin estrés	806.70 $\pm$ 157.4 ab
Con Phi + sin estrés	752.98 $\pm$ 73.5 b
Sin Phi + Estrés salino	901.95 $\pm$ 46.3 ab
Con Phi + Estrés salino	970.15 $\pm$ 31.5 a
Sin Phi + Estrés hídrico	739.64 $\pm$ 76.2 b
Con Phi + Estrés hídrico	733.31 $\pm$ 31.8 b
Pr(>F)	0.0025

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Sin y con Phi: 0 y 0.0375 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>. Estrés salino: 150 mM NaCl. Estrés hídrico: 5% PEG 6000.

### 1.6.8. Curvas de crecimiento de hojas

Los modelos de crecimiento empleados en la generación de curvas de crecimiento de hojas de caña de azúcar de los tres cultivares evaluados se presentan en el (**Cuadro 1.22**).

Las curvas de crecimiento de hoja de caña de azúcar de tres cultivares evaluados (**Figuras 1.12, 1.13 y 1.14**) permiten apreciar el efecto del Phi como bioestimulante en ausencia de estrés, y bajo estrés salino e hídrico durante 16 d de tratamiento, información que se complementa con el análisis de la variable respuesta área foliar (cm<sup>2</sup>) obtenida al final de los 16 d de tratamiento (**Cuadros 1.4, 1.5 y 1.6**), sin importar, que para el cv. COLPOS CTMex 05-204 el modelo estadístico no sea significativo.

**Cuadro 1. 22.** Modelos de cinética de crecimiento de hoja de plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo factores de estrés (salino e hídrico) tratadas con fosfito.

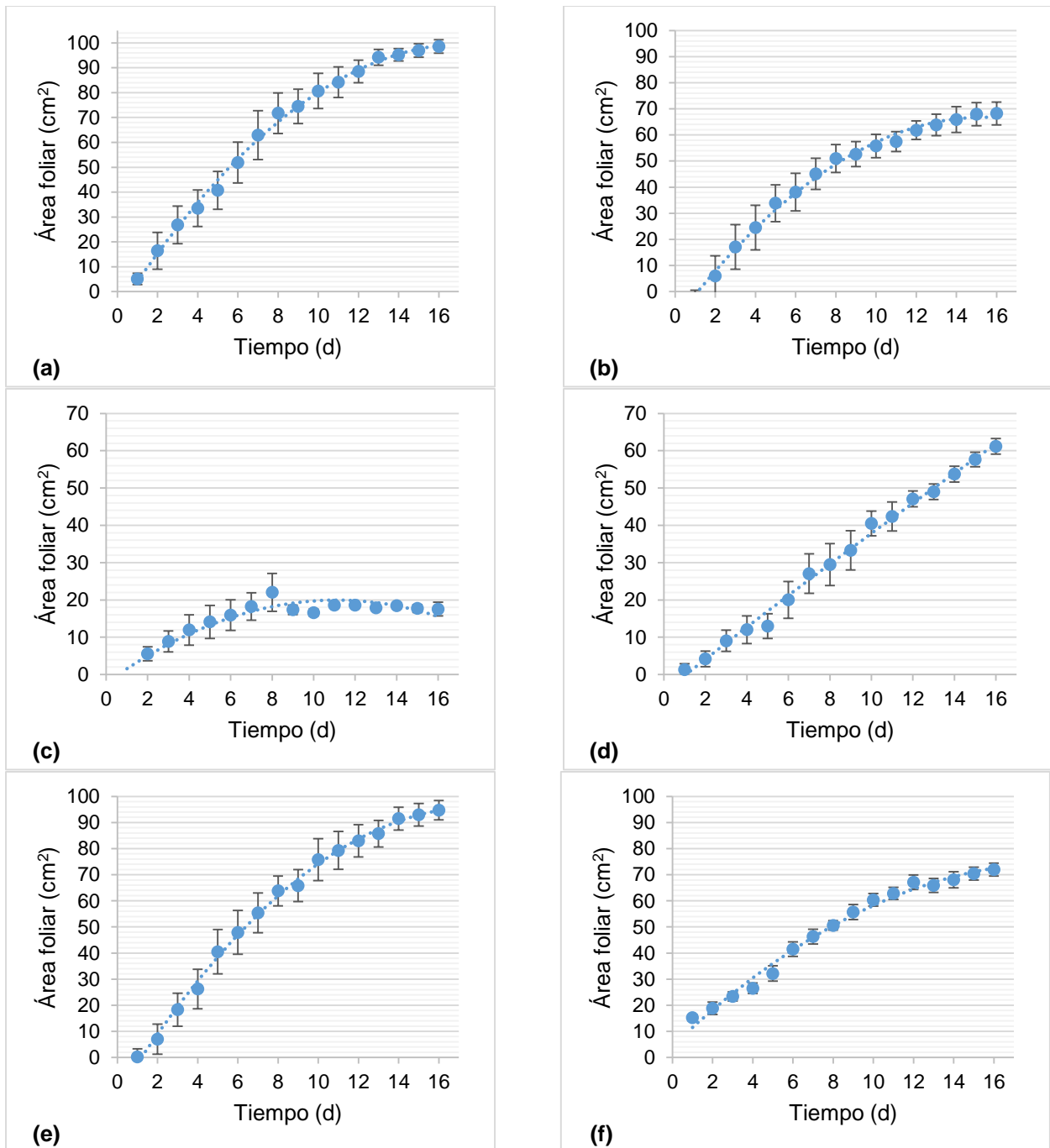
Cultivar	Tratamiento	Modelo	R <sup>2</sup>
CP 72-2086	Sin Phi + Sin estrés	$y = 0.4329x + 0.024$	0.6874
	Con Phi + Sin estrés	$y = 0.4294x - 7.6669$	0.8260
	Sin Phi + Estrés salino	$y = 0.4446x - 3.0929$	0.8592
	Con Phi + Estrés salino	$y = 0.5946x - 4.905$	0.9013
	Sin Phi + Estrés hídrico	$y = 0.5064x - 4.6485$	0.7757
	Con Phi + Estrés hídrico	$y = 0.3113x + 13.245$	0.5807
MotzMex 92-207	Sin Phi + Sin estrés	$y = 0.3416x + 10.413$	0.8229
	Con Phi + Sin estrés	$y = 0.3992x + 8.481$	0.8301
	Sin Phi + Estrés salino	$y = 0.538x - 3.3843$	0.9437
	Con Phi + Estrés salino	$y = 0.4872x + 0.1271$	0.8596
	Sin Phi + Estrés hídrico	$y = 0.4509x + 3.0447$	0.8249
	Con Phi + Estrés hídrico	$y = 0.3691x + 4.5904$	0.8361
COLPOS CTMex 05-204	Sin Phi + sin estrés	$y = 0.3549x - 1.8921$	0.8225
	Con Phi + sin estrés	$y = 0.3861x - 0.2492$	0.8466
	Sin Phi + Estrés salino	$y = 0.5282x - 0.2988$	0.8168
	Con Phi + Estrés salino	$y = 0.4864x - 3.3155$	0.8157
	Sin Phi + Estrés hídrico	$y = 0.324x - 0.8466$	0.8157
	Con Phi + Estrés hídrico	$y = 0.2996x + 3.4692$	0.8087

En la **Figura 1.12** se aprecia una reducción en la tasa de aumento del área foliar en plantas de caña de azúcar del cv. CP 72-2086 en ausencia de estrés y de déficit hídrico al adicionar Phi; sin embargo, en situación de estrés salino se tienen efectos positivos por parte de éste, al incrementar el área foliar y reducir la senescencia causada por el NaCl en hojas.

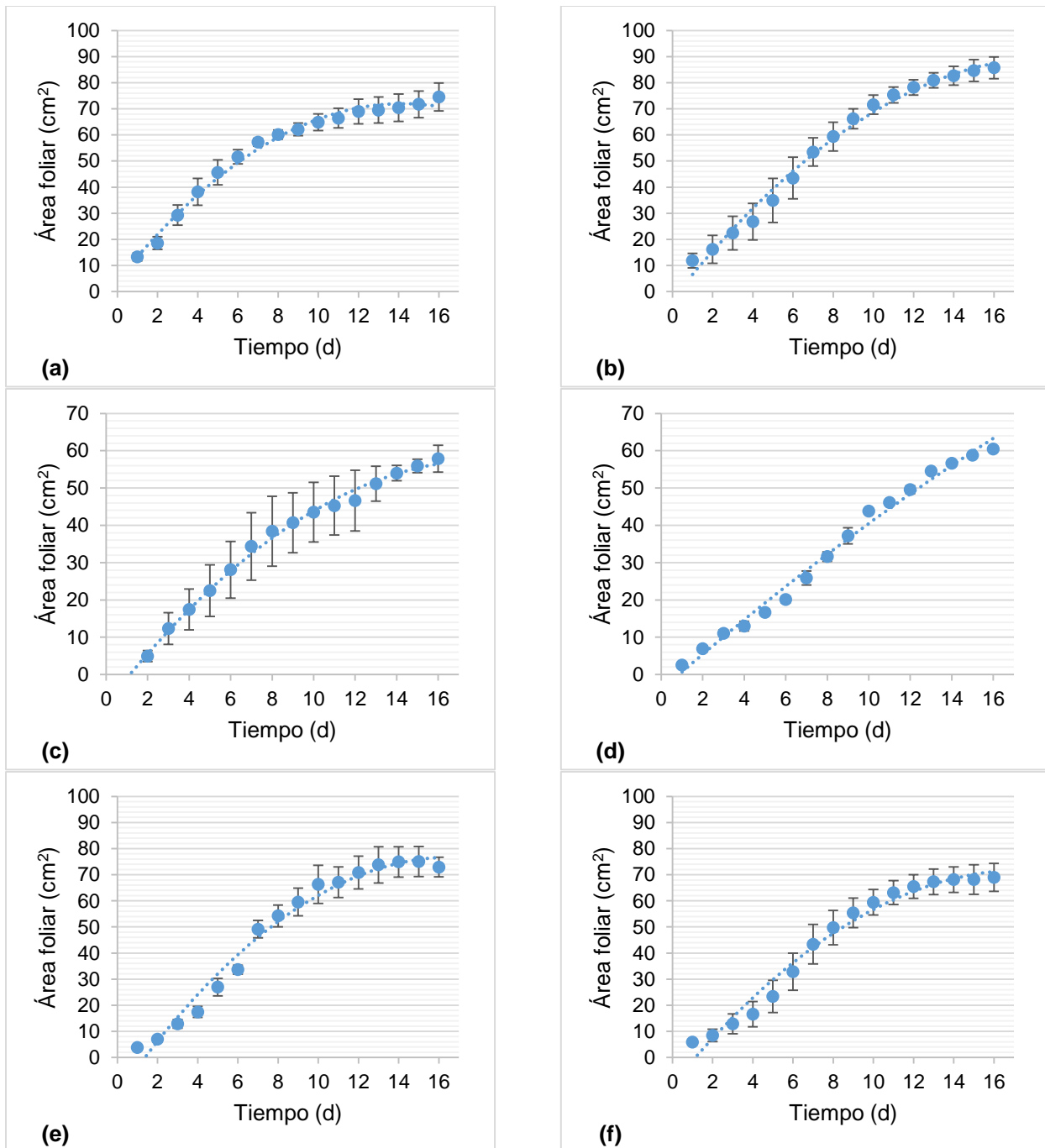
En el cv. MotzMex 92-207 se observó una reducción en la tasa de incremento de área foliar bajo déficit hídrico al adicionar Phi como bioestimulante; sin embargo, en ausencia de estrés y bajo estrés salino se tienen efectos positivos cuando se suministró Phi (**Figura 1.13**).

Se observa reducción en la tasa de aumento del área foliar en el cv. COLPOS CTMex 05-204 bajo estrés salino al adicionar Phi; sin embargo, en ausencia de estrés y con estrés hídrico, se tienen efectos positivos del Phi, al incrementar el área foliar y reducir el efecto senescente del PEG en la hoja (**Figura 1.14**).

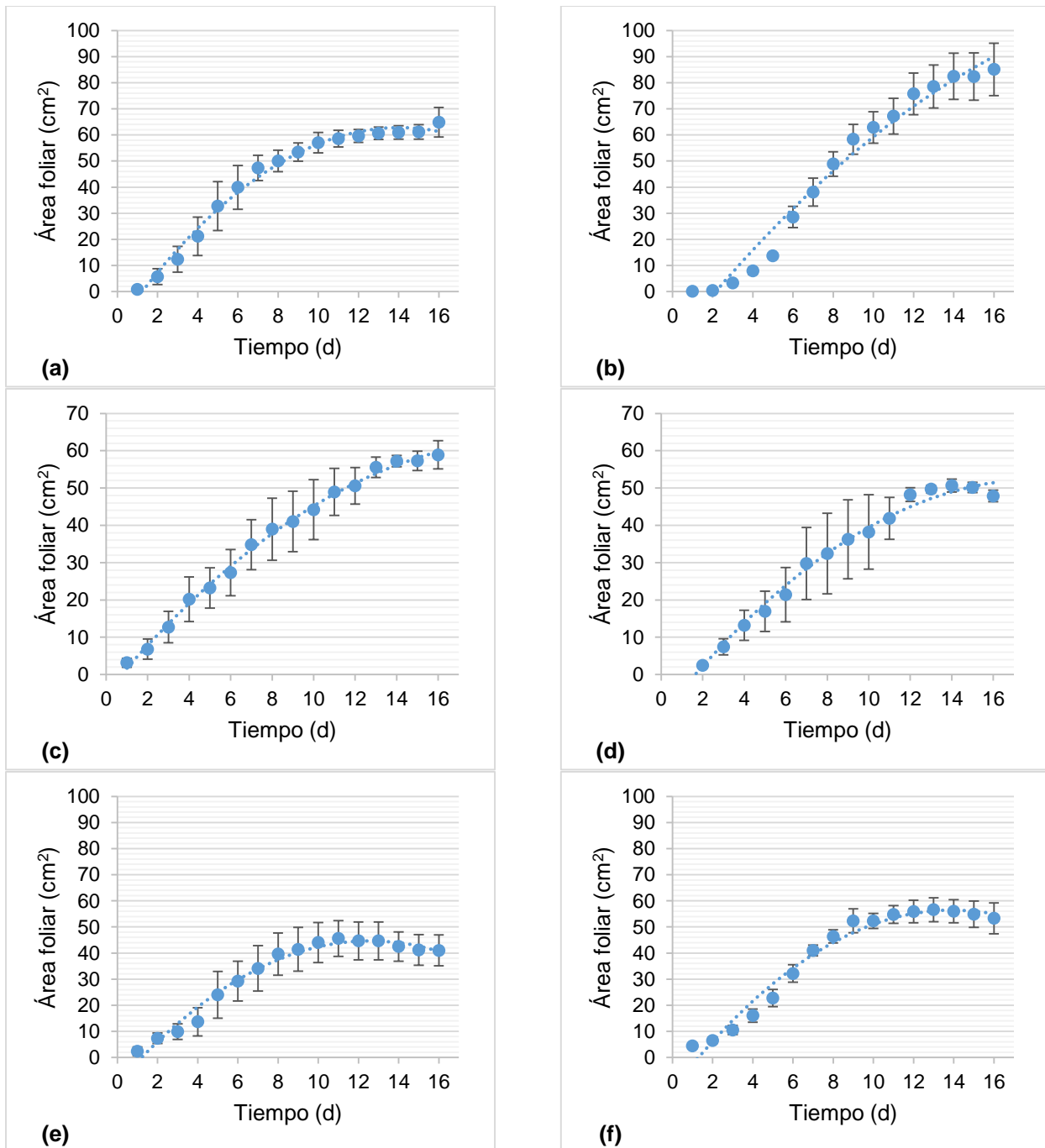




**Figura 1. 12.** Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 tratadas con fosfito y sometidas a factores de estrés. **a)** Sin fosfito + Sin estrés; **b)** Con fosfito + Sin estrés; **c)** Sin fosfito + Estrés salino; **d)** Con fosfito + Estrés salino; **e)** Sin fosfito + Estrés hídrico; y **f)** Con fosfito + Estrés hídrico.



**Figura 1. 13.** Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con fosfito y sometidas a factores de estrés. **a)** Sin fosfito + Sin estrés; **b)** Con fosfito + Sin estrés; **c)** Sin fosfito + Estrés salino; **d)** Con fosfito + Estrés salino; **e)** Sin fosfito + Estrés hídrico; y **f)** Con fosfito + Estrés hídrico.



**Figura 1. 14.** Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 tratadas con fosfito y sometidas a factores de estrés. **a)** Sin fosfito + Sin estrés; **b)** Con fosfito + Sin estrés; **c)** Sin fosfito + Estrés salino; **d)** Con fosfito + Estrés salino; **e)** Sin fosfito + Estrés hídrico; y **f)** Con fosfito + Estrés hídrico

### 1.6.9. Parámetros fotosintéticos

El estrés salino causó mayores efectos negativos que el estrés por déficit hídrico, probablemente porque el nivel de PEG de este último no causó estrés osmótico. El estrés salino ocasionó reducciones significativas del 47.6, 17.6 y 32.8% en la tasa fotosintética, del 86, 56 y 64.3% en la conductancia estomática del agua y una reducción del 64, 41.1 y 47% en la tasa de transpiración en los tres cultivares CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOSCTMex 05-204, siendo el cv. MotzMex 92-207 más resistente a la salinidad (**Cuadros 1.23, 1.24 y 1.25**).

Es importante mencionar que la adición de Phi vía radical en condiciones de ausencia de estrés, incrementaron en 21.3 y 7.6% la tasa fotosintética, en un 36 y 35.7% la conductancia estomática del agua, así como en 14.19 y 3.3% la tasa de transpiración en los cv. MotzMex 92-207 y COLPOSCTMex 05-204, contrario a lo observado en condiciones de estrés salino al reducir ligeramente la tasa fotosintética, la conductancia estomática y la tasa de transpiración (**Cuadros 1.23, 1.24 y 1.25**).

**Cuadro 1. 23.** Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. CP 72-2086 tratadas con fosfito y sometida a factores de estrés.

Tratamiento	$P_N$	$g_s$	E	$T_{hoja}$	$C_i$	EUA	$EUA_i$
Sin Phi + sin estrés	35.46	0.43	8.02	28.43	160.28	4.42	82.55
Con Phi + sin estrés	34.71	0.26	6.96	30.31	79.50	4.98	133.69
Sin Phi + Estrés	18.58	0.06	2.89	33.05	-127.29	6.43	287.46
Con Phi + Estrés	25.65	0.10	4.23	32.89	-85.86	6.06	250.77
Sin Phi + Estrés	40.36	0.31	8.31	30.95	74.21	4.85	128.22
Con Phi + Estrés	37.44	0.44	8.44	28.83	151.31	4.44	84.52

$P_N$ : tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $g_s$ : Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), E: Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), T: temperatura interna hoja ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_i$ : Concentración intracelular de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), EUA: eficiencia en el uso del agua instantánea ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $EUA_i$ : eficiencia en el uso del agua intrínseca ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

**Cuadro 1. 24.** Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con fosfito y sometida a factores de estrés.

Tratamiento	$P_N$	$g_s$	E	$T_{hoja}$	$C_i$	EUA	$EUA_i$
Sin Phi + sin estrés	33.26	0.25	7.40	31.31	81.86	4.50	132.35
Con Phi + sin estrés	40.35	0.34	8.45	30.64	87.66	4.78	118.81
Sin Phi + Estrés	27.40	0.11	4.36	32.25	-78.24	6.28	242.47
Con Phi + Estrés	25.74	0.10	4.32	33.07	-84.49	5.95	248.44
Sin Phi + Estrés	39.39	0.34	8.29	30.54	91.40	4.75	117.51
Con Phi + Estrés	38.25	0.28	8.12	31.69	62.76	4.71	136.40

$P_N$ : tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $g_s$ : Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), E: Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), T: temperatura interna hoja ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_i$ : Concentración intracelular de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), EUA: eficiencia en el uso del agua instantánea ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $EUA_i$ : eficiencia en el uso del agua intrínseca ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

**Cuadro 1. 25.** Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204 tratadas con fosfito y sometida a factores de estrés.

Tratamiento	$P_N$	$g_s$	E	$T_{hoja}$	$C_i$	EUA	$EUA_i$
Sin Phi + sin estrés	36.12	0.28	7.80	31.22	79.61	4.63	128.98
Con Phi + sin estrés	38.86	0.38	8.06	29.37	117.12	4.82	102.12
Sin Phi + Estrés	24.29	0.10	4.14	33.20	-84.95	5.87	249.91
Con Phi + Estrés	24.07	0.08	3.53	33.17	-159.47	6.82	298.60
Sin Phi + Estrés	37.74	0.27	7.61	31.08	61.13	4.96	138.55
Con Phi + Estrés	33.03	0.18	5.70	30.85	8.99	5.79	178.83

$P_N$ : tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $g_s$ : Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), E: Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), T: temperatura interna hoja ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_i$ : Concentración intracelular de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), EUA: eficiencia en el uso del agua instantánea ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $EUA_i$ : eficiencia en el uso del agua intrínseca ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

## 1.7 DISCUSIÓN

### 1.7.1. Estrés abiótico

Las plantas viven en entornos en constante cambio, están expuestas a diversas tensiones ambientales que a menudo son perjudiciales para su crecimiento y desarrollo, debido a que afectan negativamente su productividad e incluso su supervivencia, dichas tensiones se clasifican en dos categorías: estrés biótico y estrés abiótico (Le Gall *et al.*, 2015; Zhu, 2016). Uno de los indicadores clave en la evaluación de la tolerancia de las plantas al estrés abiótico es la producción de materia seca, resultado de un complejo proceso fisiológico cuyo principal sustrato son los carbohidratos (Tokarz *et al.*, 2020). La sequía y la salinidad se consideran como las tensiones abióticas que más limitan la productividad, la primera genera estrés hídrico en la planta debido a la disponibilidad limitada o nula de agua a las raíces o por pérdida de agua por transpiración alta; la segunda genera tanto estrés hídrico, resultado de la sequía fisiológica que se entiende como una baja absorción de agua por las raíces, como estrés químico, debido a la acumulación de iones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en la célula que producen citotoxicidad (Fahad *et al.*, 2017; Fleming *et al.*, 2019; Moles *et al.*, 2016; Murad *et al.*, 2014).

El cultivo de caña de azúcar en campo está sujeto a limitaciones estacionales por lo que algunos cambios en los patrones de precipitación causan la aparición de sequías frecuentes; el crecimiento vegetal se logra principalmente por la división, agrandamiento y diferenciación celular, la sequía interfiere con estos procesos afectando la mitosis, el flujo deficiente de agua en las células cercanas al xilema ocasiona daño al cloroplasto, además de afectar el rendimiento por la reducción en la tasa de fotosíntesis (Fahad *et al.*, 2017; Lamaoui *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2015), información que concuerda con lo observado en esta investigación donde la adición de estrés por sequía causó una ligera reducción en la longitud y diámetro basal de tallo, en el área foliar de los tres cultivares de caña estudiados y reducción en biomasa seca aérea en los cultivares MotzMex 92-207 y COLPOSCTMex 05-204, respecto al tratamiento testigo, (**Cuadros 1.4, 1.5 y 1.6**).

De igual modo, se conoce que al aumentar la salinidad en la solución del suelo se produce un bloqueo en la absorción de agua por las raíces, lo que limita la absorción de

nutrientes, influyendo así en la apertura estomática y, por tanto, presentando una disminución en las reacciones bioquímicas, en reducción de la actividad fotosintética y la alteración de algunas enzimas que afectan la síntesis de clorofila, lo que resulta en la pérdida de pigmentos. Por otra parte, la falta de disponibilidad de CO<sub>2</sub> conduce a un mayor cierre estomático, provocado por la reducción del consumo de NADPH producido por el ciclo de Calvin. En conclusión, el estrés por salinidad afecta negativamente los diferentes parámetros: clorofila, crecimiento, biomasa, estado de agua y absorción de nutrientes (Chiconato *et al.*, 2019; Hameed *et al.*, 2014; Leitão & Enguita, 2016; Parihar *et al.*, 2015), esta información concuerda con la obtenida en la presente investigación, donde la adición de NaCl redujo significativamente la biomasa aérea, la longitud de tallo, la concentración de pigmentos fotosintéticos clorofila *a*, *b* y carotenos en hojas, así como la *P<sub>N</sub>*, *g<sub>s</sub>* y *E* en los tres cultivares de caña de azúcar estudiados respecto al tratamiento testigo (**Cuadros 1.4, 1.5, 1.6, 1.16, 1.17, 1.18, 1.23, 1.24 y 1.25**).

### **1.7.2. Bioestimulación**

Yakhin *et al.* (2017) señalan que los autores Zhang y Schmidt definieron en 1997 el concepto de bioestimulante como un acondicionador previo al estrés, ya que sus efectos se manifiestan en una mejor eficiencia fotosintética, reducción de la propagación e intensidad de algunas enfermedades y en mejores rendimientos. Actualmente, se conoce que los bioestimulantes son sustancias naturales y respetuosas con el medio ambiente (Karapouloutidou & Gasparatos, 2019), pueden actuar directamente en la fisiología y el metabolismo de las plantas mejorando las condiciones del suelo; además, son capaces de modificar algunos procesos moleculares que permiten mejorar la eficiencia del uso de agua y nutrimentos en los cultivos, estimulan el desarrollo de la planta y contrarrestan el estrés abiótico mejorando los metabolismos primario y secundario (Bulgari *et al.*, 2019). Motivo por el cual se integran cada vez más en los sistemas de producción (Han *et al.*, 2021).

El fosfito también conocido como fosfonato (Phi; H<sub>2</sub>PO<sub>3</sub><sup>-</sup>), es una forma reducida y análogo estructural de fosfato (Pi; H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) que es eficientemente absorbido por el sistema de transporte de Pi y rápidamente movilizado por el xilema y el floema de las plantas (López-Arredondo & Herrera-Estrella, 2013). du Jardin (2015) clasifica a las sales

de fosfito en la categoría de bioestimulantes inorgánicos, ya que la respuesta de la planta a su adición con frecuencia no puede explicarse por consecuencia de la conocida función antifúngica de sus moléculas (Thao & Yamakawa, 2009); de esta manera, el Phi está emergiendo como un novedoso bioestimulante que confiere también tolerancia al estrés abiótico (Gómez-Merino & Trejo-Téllez, 2015), es importante mencionar que la mayoría de programas de mejoramiento se realizan en condiciones óptimas de nutrientes, haciendo que ciertas variedades e híbridos modernos sean más dependientes y requieran cantidades significativas de fertilizante (Herrera-Estrella & López-Arredondo, 2016); sin embargo, en lo que respecta al Phi sigue siendo un reto determinar un método correcto de aplicación, así como su fuente, tasa y la etapa fenológica adecuada en función a los distintos cultivos agrícolas no biotecnológicos y a su alta movilidad a lo largo de la planta. De acuerdo con Han *et al.* (2021), concentraciones bajas de Phi (< 1 mM) provocan efectos bioestimulantes. Además, Gómez-Merino & Trejo-Téllez (2016) mencionan que el uso de Phi como bioestimulante potencializa los niveles nutricionales usando dosis adecuadas. Así mismo, Lovatt & Mikkelsen (2006) consideran que la eficiencia de Phi es mayor cuando la dosis y su aplicación se sincronizan adecuadamente para satisfacer las necesidades del cultivo. Lovatt & Mikkelsen (2006) y Casasola-Elizondo *et al.* (2017) reportan incrementos significativos en el peso de biomasa seca de hoja, tallo y raíz al adicionar Phi como bioestimulante en plántulas de tomate bajo estrés por metal pesado, por su parte, Calvo *et al.* (2014) en su revisión, presentan ejemplos de bioestimulantes para mejorar la producción de cultivos ante tensiones abióticas como la sequía y salinidad del suelo, teniendo como respuesta un incremento en el crecimiento de las plantas y en el contenido de clorofila de las hojas al adicionar ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y extractos de alga, información que concuerda con la obtenida en nuestra investigación, donde, en condiciones de suficiencia de P como Pi, la adición de Phi incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos en las tres variedades de caña de azúcar (**Cuadros 1.16, 1.17 y 1.19**). Karthikeyan & Shanmugam (2017) mencionan que uno de los principales parámetros para proporcionar información sobre el estado general del cultivo es la altura de planta, siendo el cv. MotzMex 92-207 el que mostró una longitud de tallo mayor respecto al tratamiento sin bioestimulante (**Cuadro 1.5**).



### 1.7.3. Interacciones entre bioestimulación y estrés abiótico

El estrés por sequía se produce cuando la humedad en el suelo y la atmósfera son bajas respecto una temperatura ambiental alta (Lamaoui *et al.*, 2018); por consiguiente, la primer respuesta de la planta al déficit hídrico es una reducción de crecimiento y conforme el potencial hídrico decrece, la tasa de fotosíntesis también lo hace (Azevedo *et al.*, 2011). La respuesta más importante en casi todas las plantas al estrés por falta de humedad es el cierre de estomas, para evitar pérdidas de agua por transpiración, este cierre provoca una reducción en la disponibilidad de CO<sub>2</sub> lo que ocasiona que la hoja sea más sensible al daño oxidativo, así como una baja eficiencia en el uso del agua intrínseca (EUA<sub>i</sub>) que es la relación entre la biomasa seca acumulada y el agua consumida (Fahad *et al.*, 2017; Lamaoui *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2016; Osakabe *et al.*, 2014). Lo anterior, coincide con lo observado en este estudio, donde en condiciones de sequía ligera, la longitud de tallo y la biomasa seca aérea se ven reducidas en los tres cultivares de caña respecto al tratamiento sin estrés, (**Cuadros 1.4, 1.5 y 1.6**); también se observa que la adición de Phi a la solución nutritiva incrementó la acumulación de biomasa seca en los tres cultivares de caña de azúcar (**Cuadros 1.4, 1.5 y 1.6**), concordando con lo reportado por Fleming *et al.* (2019) donde aplicaciones foliares del producto comercial Trafos K<sup>®</sup> (K<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>) incrementó la longitud, el número de hojas y el diámetro de tallo de plantas de *Arabidopsis thaliana* durante 7 d de régimen de sequía. Además, se posee evidencia suficiente para avalar que la adición de Phi optimizó la EUA<sub>i</sub> e incrementó significativamente la longitud de tallo en el cv. MotzMex 92-207 (**Cuadros 1.5 y 1.24**).

Por otra parte, la mayoría de las plantas son susceptibles al estrés salino y en concentraciones de NaCl superiores a 100 mM en el suelo tienen problemas de productividad; del mismo modo, se ha documentado una reducción en la biomasa aérea, en la tasa fotosintética ( $P_N$ ) y en la conductancia estomática ( $g_s$ ) a partir de 80 mM NaCl en el suelo en una variedad de caña de azúcar no tolerante a salinidad (Chiconato *et al.*, 2019). Asimismo, se han reportado reducciones significativas en la  $P_N$ , biomasa seca aérea y de raíz en las variedades de caña de azúcar RB855536 y RB867515 sometidas a 100 mM NaCl durante 48 d (Murad *et al.*, 2014); estos resultados coinciden con lo observado en este estudio donde la adición de 150 mM NaCl redujo la biomasa aérea y

longitud de tallo en las tres variedades de caña (**Cuadros 1.4, 1.5 y 1.6**), siendo el cv. COLPOS CTMex 05-204 más susceptible al estrés salino. Asimismo, se observó también que la adición de Phi como bioestimulante en condiciones de salinidad resultó en una reducción menor en la biomasa aérea de los cultivares CP 72- 2086 y MotzMex 92-207 respecto a las plantas sin Phi (**Cuadro 1.5 y 1.6**).

Un efecto típico del estrés por NaCl es producto de la toxicidad del ion sodio ( $\text{Na}^+$ ) que se acumula rápidamente en las plantas lo que provoca la reducción de otros cationes como  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  ocasionando un desbalance iónico en la homeostasis de las células (Bulgari *et al.*, 2019; Fan *et al.*, 2020). Esta información ratifica la letalidad del tratamiento salino al disminuir drásticamente la acumulación de cationes esenciales respecto a sodio en hojas de caña de azúcar, además de observar que el cv. MotzMex 92-207 fue el que mejor respuesta expreso a la adición de Phi como bioestimulante (**Cuadro 1.10**).

La fotosíntesis es un proceso bioquímico complejo que se lleva a cabo en el cloroplasto, pero puede resumirse como la absorción de luz por una colección de pigmentos fotosintéticos (Senge *et al.*, 2014) que se encuentran ubicados en la membrana del tilacoide (Johnson, 2016), dichos pigmentos son fotorreceptores de la planta que perciben la radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400-700 nm) como una fuente de energía (Dou & Niu, 2020).

El término “pigmento vegetal” es una expresión genérica usada para referirse a moléculas que confieren una coloración específica al tejido de la planta (Schoefs, 2002); la clorofila, una clase fundamental de tetrapirrol, es el pigmento predominante en el proceso fotosintético ya que absorbe la luz en el espectro azul y rojo por lo que es de color verde; mientras que, los carotenos son pigmentos auxiliares solubles en lípidos que se encuentran en las membranas celulares de los cloroplastos y cromoplastos (Leiva-Ampuero *et al.*, 2020) que absorben luz solo en el espectro azul por lo que sus colores son amarillo y rojo. Sin embargo, la importancia en la cuantificación de estos pigmentos se debe a que determinan la estructura y función del aparato fotosintético (Li *et al.*, 2016), además, de ser constituyentes internos importantes para determinar la eficiencia de fotosintética (Lamaoui *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2007) que se ve afectada por factores externos como la luz, la temperatura y el  $\text{CO}_2$ .

Las clorofilas y los carotenos, son compuestos orgánicos que juegan roles importantes en el proceso de recolección y optimización de la luz, así como protección contra el daño fotooxidativo (Pérez-gálvez *et al.*, 2020). Se ha demostrado que cuanto mayor es el contenido de clorofila por unidad de volumen celular, mayor es la tasa de fotosíntesis debido a que hay más centros de captura de CO<sub>2</sub> y por lo tanto, hay mayor tasa de crecimiento (Rathore & Jasrai, 2013). Por último, es importante mencionar que la fotosíntesis es su proceso que integra varios componentes como son los fotosistemas y pigmentos fotosintéticos, el sistema de transporte de electrones y vías de reducción de CO<sub>2</sub>, por lo que, un efecto negativo en cualquier componente de estos sistemas puede conducir a una reducción en el rendimiento fotosintético general.

No se posee evidencia de que en condiciones de ausencia estrés, la aplicación de Phi vía raíz tuviese efectos significativos en las variables de crecimiento, pigmentos fotosintéticos y aminoácidos libres totales (**Cuadros 1.4, 1.5, 1.6, 1.16, 1.17, 1.18, 1.19, 1.20 y 1.21**). Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Vinas *et al.* (2020) donde pulverizaciones foliares de distintos productos a base de Phi (KPhi, CaPhi, AlPhi y H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a una concentración de 25 mM no tuvieron influencia en la producción de biomasa seca aérea, contenido relativo de clorofila y estado nutrimental de plantas de tomate. Por su parte, Estrada-Ortiz *et al.* (2016) concluyen que, para obtener efectos positivos, las aplicaciones de Phi deben regularse estrictamente según el genotipo de planta y usarse a niveles bajos en presencia de suficiencia de Pi; al observar un aumento en la concentración de clorofilas en hojas de acelga al aplicar 25 mM Phi; sin embargo, la concentración de estos pigmentos decrece en el tratamiento de 50 mM Phi. Por el contrario, estos autores observaron en hojas de lechuga que la concentración de clorofila *a*, *b* y *a+b* sigue aumentado a una dosis de 50 mM Phi; esta respuesta se observó en esta investigación, donde en condiciones de no estrés, la aplicación de Phi provocó efectos positivos en la concentración de pigmentos fotosintéticos en hojas de caña de azúcar de variedades de maduración temprana (**Cuadros 1.16 y 1.18**).

El estrés hídrico provoca fotoinhibición y cambios negativos en la concentración de clorofilas; este fotodaño afecta la membrana de los tilacoides lo que conlleva a una reducción en el contenido de clorofila (Fahad *et al.*, 2017; Y. Wang *et al.*, 2018) y provoca

la inactivación irreversible del PS II (Li *et al.*, 2016). Además, Zhang *et al.* (2015) documentan reducciones en el contenido de clorofilas *a*, *b* y *a/b* en plantas de caña de azúcar sometidas a estrés moderado y severo por sequía, también reporta un incremento no significativo en la concentración de clorofila *b* cuando se somete a un ligero déficit hídrico, información que coincide con lo reportado para los cultivares menos afectados por la sequía en este estudio que fueron CP 72-2086 y COLPOS CTMex 05-204 (**Cuadros 1.16 y 1.18**).

La adición de Phi a la solución nutritiva, incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos en hojas de tres cultivares de caña de azúcar sometidas a un ligero estrés por déficit hídrico (**Cuadros 1.16, 1.17 y 1.18**), información que coincide con la de muchos investigadores que estudian el comportamiento de distintos bioestimulantes vegetales bajo condiciones de estrés por sequía (dos Reis *et al.*, 2019; Goñi *et al.*, 2018; Mirajkar *et al.*, 2019).

De igual modo, Tokarz *et al.* (2020) reportaron una reducción en la concentración de clorofilas *a*, *b*, y total (*a+b*), así como de carotenos en biomasa seca aérea de almorta (*Lathyrus sativus*) como resultado de trastornos de la síntesis de clorofila al inducir estrés salino y estrés por sequía, y no como una degradación de la molécula; esto debido a que, la relación de clorofilas *a/b* no presentó cambios significativos. Estos resultados de la relación de concentración de clorofilas no coincide con los resultados aquí obtenidos debido a que ninguna de las variedades de caña de azúcar estudiadas son tolerantes a salinidad y sequía (**Cuadros 1.16, 1.17 y 1.18**), por lo que la concentración de NaCl en la solución nutritiva provocó un daño severo al aparato fotosintético debido al desbalance en las proporciones de clorofila *a* y *b*, perturbando la estequiometría fija de cada proteína fotosintética (Fan *et al.*, 2020; Tanaka & Tanaka, 2007). Patade *et al.* (2011) documentan que en condiciones isoosmóticas de estrés salino (NaCl, 150 mM) y de estrés por sequía (PEG-8000, 20% p/v), el contenido total de clorofilas y carotenoides en hojas de plantas de caña de azúcar disminuyó.

En este estudio se observa que la adición de Phi a la solución nutritiva, incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos en hojas de tres cultivares de caña de azúcar sometidas a estrés severo por NaCl (**Cuadros 1.16, 1.17 y 1.18**), información que

coincide con la de muchas investigaciones que evalúan el efecto de distintos bioestimulantes vegetales bajo condiciones de estrés salino (Loubser & Hills, 2020; Merwad, 2020; Rady *et al.*, 2019). Otro efecto positivo que se observa en el tratamiento con Phi es el balance en la proporción de clorofilas *a+b*/carotenoides en plantas de caña de azúcar cultivar MotzMex 92-207 (**Cuadro 1.17**).

Oyarburo *et al.* (2015) reportan que aspersiones foliares de KPhi en hojas de papa a manera de pre-tratamiento ante el estrés por radiación UV-B, tuvo un efecto beneficioso sobre dos parámetros fotosintéticos, específicamente el contenido de clorofila y la expresión del gen *psbA* que codifica la proteína D1 del centro de reacción PS II, donde previno el estrés oxidativo causado por UV-B, además, se observó una disminución en la acumulación de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en las hojas y un aumento en las actividades de guaiacol peroxidasa (GPX) y superóxido dismutasa (SOD). También, los niveles de expresión de un gen involucrado en la síntesis de flavonoides aumentaron en plantas estresadas con UV-B solo cuando se trataron previamente con KPhi. Finalmente, la acumulación de glucanasas y quitinasas fue inducida por el estrés UV-B y marcadamente potenciada por el pretratamiento con KPhi, información, que coincide con la obtenida en la presente investigación, donde, la concentración de clorofila *a*, *b*, total y carotenos se incrementaron al adicionar 15% Phi como bioestimulante vía radical a la solución nutritiva bajo condiciones de estrés salino y por déficit hídrico en los tres cultivares CP 72 2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204 (**Cuadros 1.16, 1.17 y 1.18**).

Machinandiarena *et al.* (2018) mencionan que aspersiones foliares de KPhi en hojas de papa a manera de pre-tratamiento ante el estrés por radiación UV-B, mejoraron la expresión de genes *CCoAOMT* involucrados en la biosíntesis de lignina y *EXT* que codifican proteínas esenciales de la estructura de la pared celular, así como un aumento de la actividad de las peroxidases (POD), del mismo modo, Ávila *et al.* (2011), mencionan que la sustitución de 25% de Pi por Phi en la solución nutritiva indujo una mejora en la actividad de guaiacol (POD) y la biosíntesis de lignina en plantas de maíz, información, que coincide con la obtenida en la presente investigación, donde, la biomasa seca aérea

y el diámetro de tallo se incrementaron al adicionar Phi como bioestimulante en condiciones de estrés salino y por déficit hídrico (**Cuadros 1.4, 1.5 y 1.6**).

Bassi *et al.* (2018) indican que la fotosíntesis está influenciada por muchos factores ambientales como la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, la incidencia de la luz, la temperatura, la disponibilidad de agua y la concentración de nitrógeno (N) en las hojas, esta última, relacionada con la partición del N en las enzimas fotosintéticas, el contenido de pigmentos, el tamaño, número y composición de los cloroplastos.

Es importante mencionar que las plantas requieren nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre en concentraciones relativamente grandes (>0.1% de la masa seca), cada uno de estos llamados macronutrientes, son esenciales para que las plantas completen su ciclo de vida ideal (Maathuis, 2009).

El N tiene una función central en el metabolismo de las plantas como constituyente de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, coenzimas, fitohormonas y metabolitos secundarios. En caña de azúcar tiene un rol importante en la actividad meristemática, promotor de amacollamiento y de retoños (Kingston, 2013). Bassi *et al.* (2018), justifican que la influencia del N en el establecimiento de la fotosíntesis y otras vías metabólicas relacionadas con el crecimiento y desarrollo de la hoja es altamente dinámica, esto después de comparar concentraciones de N y metabolitos secundarios en la parte basal, media y apical de hojas de dos genotipos de caña de azúcar sensibles a deficiencias de N (RB975375) y tolerante (RN937570). Estos resultados coinciden con los obtenidos en esta investigación, donde las lecturas de fotosíntesis ( $P_N$ ) en la parte media de la hoja madura más joven, no se correlacionan con la concentración de N en hojas de los tres genotipos de caña estudiados (**Cuadros 1.7, 1.10, 1.13, 1.23, 1.24 y 1.25**).

El fósforo (P) es un elemento constituyente de los ácidos nucleicos, motivo por el que es crucial en la división celular y la transferencia de heredabilidad, juega un papel clave en la transferencia de energía como componente de los fosfatos de adenosina. También es esencial para la transferencia de carbohidratos en las células de las hojas (Hawkesford *et al.*, 2012), y en caña de azúcar es vital para el amacollamiento y formación de un sistema radicular fuerte y vigoroso (da Silveira *et al.*, 2014).

El potasio (K) desempeña la función de mantener el potencial de la membrana plasmática (osmorregulación) que es importante para la extensión celular, la apertura de los estomas, la homeostasis de los iones, la activación de enzimas, la transducción de señales y otros procesos fisiológicos (Zeng *et al.*, 2015). Raposo *et al.* (2013) señalan que al adicionar aspersiones foliares de  $K_2HPO_3$  en hojas de plantas de caña de azúcar de los cultivares CP 81-3250 de 270 d de edad sembradas en campo, se incrementa el rendimiento total de azúcar cosechado, la concentración de macronutrientes (Ca, K y Mg) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) respecto al tratamiento testigo; contrariamente, estos resultados no coinciden con los aquí reportados, ya que se presentaron reducciones significativas en la concentración de S, Ca, Mg y K en hoja al adicionar Phi como bioestimulante a la solución nutritiva en ausencia de estrés; sin embargo, en condiciones de sequía ligera, las plantas de caña cv. MotzMex 92-207 manifestaron un incremento significativo en la concentración en hoja de P, K, Mg y S al adicionar Phi como bioestimulante (**Cuadros 1.7, 1.10 y 1.13**).

El calcio (Ca) es importante para la estabilización de la membrana y la pared celular, la osmorregulación y como segundo mensajero que permite a las plantas regular los procesos de desarrollo en respuesta a los estímulos ambientales (Hawkesford *et al.*, 2012). En su estudio Han *et al.* (2021) comprobaron que aplicaciones foliares de Phi tuvieron un fuerte impacto en la ruta de biosíntesis de flavonoides (isoflavonoides y fenilpropanoides), explicando así, que las plantas tratadas con Phi expresan tolerancia al estrés biótico y abiótico debido a la acumulación de ligninas, las cuales son unidades fundamentales de la pared celular secundaria que contribuyen a la estabilidad, rigidez y robustez de las plantas contra daños mecánicos o ambientales, sin embargo, Phi no solo indujo genes relacionados con respuestas a estímulos bióticos, sino que también genes involucrados en respuesta a estímulos abióticos, como heridas, estrés oxidativo, sequía, luz, radiación, estrés osmótico, iones metálicos e incluso vías de señalización y reparación del ADN, donde la activación de ciertos mecanismos de defensa inducidos por el bioestimulante (Phi;  $KH_2PO_3$ ) aumentó la concentración de  $Ca^{2+}$  en el citosol, la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la respuesta hipersensible (HR) localizada, el refuerzo de la pared celular y cierre de estomas, efectos que no coinciden con lo obtenido en los tres cultivares de caña estudiados en esta investigación, dado que

el análisis de nutrientes (**Cuadro 1.7, 1.10 y 1.13**) se realizó después de 14d de tratamiento y no en periodos cortos de horas como en dicha investigación.

El magnesio (Mg) es componente estructural de la clorofila, es necesario para la fotosíntesis y la síntesis de proteínas. La mayor parte del tejido con  $Mg^{2+}$  reside en la vacuola, donde contribuye a la generación de turgencia y al equilibrio de carga de los aniones. Dada su función principal en los cloroplastos, el  $Mg^{2+}$  tisular más alto suele medirse en los brotes (Maathuis, 2009). En el caso del cultivo de caña de azúcar, la deficiencia de Mg afecta la cantidad de sacarosa en los tallos, debido a que la carga de fotoasimilados en el floema se ve gravemente afectada, desafortunadamente esto ocurre antes de que se produzcan cambios visibles en el crecimiento de los brotes, la concentración de clorofila o la actividad fotosintética (García *et al.*, 2020). De acuerdo con Xi *et al.* (2020), la aplicación de Phi ( $KH_2PO_3$ ) mejoró las características fenotípicas y la altura de plantas de papa, además, aumentó el contenido de clorofila y mantuvo la reactividad del centro de reacción PSII bajo estrés por calor, lo que sugiere que Phi ayuda a las plantas a tener un mejor rendimiento bajo condiciones de estrés abiótico, esta información coincide con lo obtenido en esta investigación, donde la aplicación de Phi como bioestimulante incremento significativamente la altura de planta y concentración de Mg en hojas de planta de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 (**Cuadros 1.5 y 1.10**).

El azufre (S) es un componente de las proteínas, de los aminoácidos (cisteína y metionina), vitaminas (biotina y tiamina), cofactores (Co-A y S-adenosil metionina, SAM) y una variedad de metabolitos secundarios, además, es un sustrato/reductor importante en las reacciones durante los procesos de estrés abiótico, por consiguiente, posee múltiples funciones en el desarrollo de las plantas, incluidas funciones catalíticas, reguladoras y estructurales (como en los enlaces disulfuro de proteínas, los ésteres de  $SO_4^{2-}$  de la membrana celular y el transporte de electrones a través de los grupos Fe-S). Los compuestos que contienen S, como las fitoquelatinas y el glutatión, desempeñan un papel en la homeostasis de los elementos traza, siendo este último, un importante antioxidante en la defensa contra el estrés y la principal fuente no proteica de S presente en todos los compartimientos de las células de las raíces y las hojas, a excepción del apoplasto (Capaldi *et al.*, 2015).



Los micronutrientes son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, se requieren en cantidades mucho menores que las de los macronutrientes (Fageria *et al.*, 2002). Entre ellos, el hierro (Fe) juega un papel crucial en los sistemas redox en las células y en diversas enzimas, tiene el papel de cofactor en algunas proteínas, la mayor cantidad de Fe en las células vegetales se requiere en la mitocondria y el cloroplasto (Forieri *et al.*, 2013). Por otra parte, el manganeso (Mn) y el cobre (Cu) son importantes para los sistemas redox, como activadores de varias enzimas, incluidas las involucradas en la desintoxicación de los radicales superóxido, y para la síntesis de lignina. Igualmente, el zinc (Zn) desempeña un papel en la desintoxicación de los radicales superóxido, la integridad de la membrana y la síntesis de proteínas y la fitohormona ácido indol-3-acético (AIA). El boro (B) es crucial para la integridad de la membrana y la pared celular (Broadley *et al.*, 2012), en plantas de caña de azúcar se tiene evidencia produce efectos positivos en el rendimiento total de azúcar cosechada al adicionar aspersiones foliares de micronutrientes en el cv. CP 81 3250 a los 30, 90 y 150 d después de las cosechas (Raposo *et al.*, 2013).

La salinidad es uno de los principales factores que afectan la disponibilidad de nutrientes en las plantas, esto se debe a efectos osmóticos que restringen la absorción de agua. Por su parte, Castañeda-Castro *et al.* (2021) documentan una reducción significativa en la altura de planta, el índice indirecto de clorofila (SPAD) y la concentración nutrimental de N y P de dos cultivares comerciales de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290) al adicionar concentraciones de 71.8, 143.6, 215.4 y 282.7 mM NaCl a la solución nutritiva en medio de cultivo *in vitro*. Estos resultados coinciden con la obtenida en esta investigación, donde, además, el efecto positivo de Phi como bioestimulante en la solución nutritiva redujo significativamente la concentración de Na en hojas y tallo de los cv. CP 72-2086 y MotzMex 92-207 (**Cuadros 1.7 y 1.10**).

## 1.8 CONCLUSIONES

La inducción de estrés abiótico vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 25% redujo de manera significativa variables de crecimiento, concentración de pigmentos fotosintéticos, aminoácidos libres totales y de nutrientes en cultivares de caña de azúcar CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05 204.

El aporte de Phi ( $0.0375 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ ) vía radicular la solución nutritiva de Steiner al 25%, incrementó la concentración pigmentos fotosintéticos en hojas de caña de azúcar CP 72 2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05 204.

Se observa que el cv. MotzMex 92-207 de maduración no temprana, fue la planta de caña de azúcar que mejor respuesta tuvo a la adición de Phi como bioestimulante vía radicular en la SNS al 25% en condiciones de estrés abiótico.

## FOSFITO E INTENSIDAD LUMINOSA EN CAÑA DE AZÚCAR

### 2.1 RESUMEN

Las plantas son organismos sésiles incapaces de escapar a su entorno, por tanto, deben hacer frente a la variabilidad de la luz solar que incide sobre ellas y al estrés por sombra. Las sales de Phi siguen posicionándose como un bioestimulante vegetal, ya que confiere tolerancia ante ciertos factores de estrés abiótico. Motivo por el que, en la presente investigación se estudio el efecto de Phi en situación de estrés abiótico en crecimiento, absorción nutrimental, contenido de pigmentos fotosintéticos y aminoácidos libres totales en hoja de tres cultivares de caña de azúcar (CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204) como planta modelo. Se observa que, la adición de Phi vía radical no logro mitigar los efectos negativos en situación de estrés por deficiencia de luz, contrario a lo observado en situación de suficiencia de luz en el cv. MotzMex 92-207, donde la aplicación de Phi a concentración de 10% del P total como Phi redujo en 31.9, 40.2, 33.9 y 28.3% la concentración de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total y carotenos, pero la aplicación de Phi a concentración de 20% del P total incremento en 30.4, 34.6, 31.1, 144 y 35.4% el área foliar, la biomasa seca aérea, el peso de biomasa fresca de hoja y, raíz y peso de biomasa seca de hoja. Se posee evidencia suficiente para concluir que el estrés por sombra afectó de manera negativa las variables descriptivas y nutrimentales de los tres cv. CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204 e incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos del cv. CP 72-2086 de plantas de caña de azúcar, además, el cv. MotzMex 92-207, fue la planta de caña de azúcar que tuvo mejor respuesta a la adición de Phi como bioestimulante vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 35%.

**Palabras clave:** Fosfito, bioestimulante, estrés abiótico, sombra, caña de azúcar.

## CHAPTER II. PHOSPHITE AND LIGHT INTENSITY IN SUGAR CANE

### 2.2 ABSTRACT

Plants are sessile organisms incapable of escaping from their environment, therefore, they must deal with the variability of sunlight that falls on them and stress due to shade. Phi salts continue to position themselves as a plant biostimulant, since they confer tolerance to certain abiotic stress factors. Reason why, in the present investigation, the effect of Phi was studied in a situation of abiotic stress on growth, nutrient absorption, content of photosynthetic pigments and total free amino acids in leaves of three sugarcane cultivars (CP 72-2086, MotzMex 92-207 and COLPOS CTMex 05-204) as a model plant. It is observed that the addition of Phi via the radical did not mitigate the negative effects in a situation of stress due to light deficiency, contrary to what was observed in a situation of sufficiency of light in cv. MotzMex 92-207, where the application of Phi at a concentration of 10% of total P as Phi reduced the concentration of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll and carotenes by 31.9, 40.2, 33.9 and 28.3%, but the application of Phi a concentration of 20% of the total P increased in 30.4, 34.6, 31.1, 144 and 35.4% the foliar area, the aerial dry biomass, the weight of fresh biomass of leaf and, root and weight of dry biomass of leaf. There is sufficient evidence to conclude that shade stress negatively affected the descriptive and nutritional variables of the three cv. CP 72-2086, MotzMex 92-207 and COLPOS CTMex 05-204 and increased the concentration of photosynthetic pigments of cv. CP 72-2086 of sugarcane plants, in addition, the cv. MotzMex 92-207, was the sugarcane plant that had the best response to the addition of Phi as a root biostimulant in the 35% Steiner nutrient solution.

**Key words:** Phosphite, biostimulant, abiotic stress, shade, sugarcane.

## **2.3 OBJETIVO**

Evaluar el efecto del suministro de fosfito ( $\text{Phi}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) vía radical, en el crecimiento, absorción nutrimental, parámetros fotosintéticos y concentraciones foliares de pigmentos fotosintéticos y aminoácidos en plantas de caña de azúcar sometidas a estrés por deficiencia lumínica.

## **2.4 HIPÓTESIS**

El tratamiento con  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$  adicionado a la solución nutritiva, en plantas de caña de azúcar sometidas a estrés por deficiencia lumínica (sombreado), reduce el efecto negativo de éste en el crecimiento, la absorción nutrimental, parámetros fotosintéticos y en las concentraciones foliares de clorofilas y aminoácidos.

## **2.5 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.5.1. Localización área experimental**

El experimento se realizó en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica durante los meses de julio a octubre de 2019, registrando una temperatura media de 21.23 °C, una HR de 57.99% y un punto de rocío de 10.38 °C; Dentro de la malla sombra se obtuvo una temperatura media de 19.36°C, con una HR de 52.16% y un punto de rocío de 7.49°C.

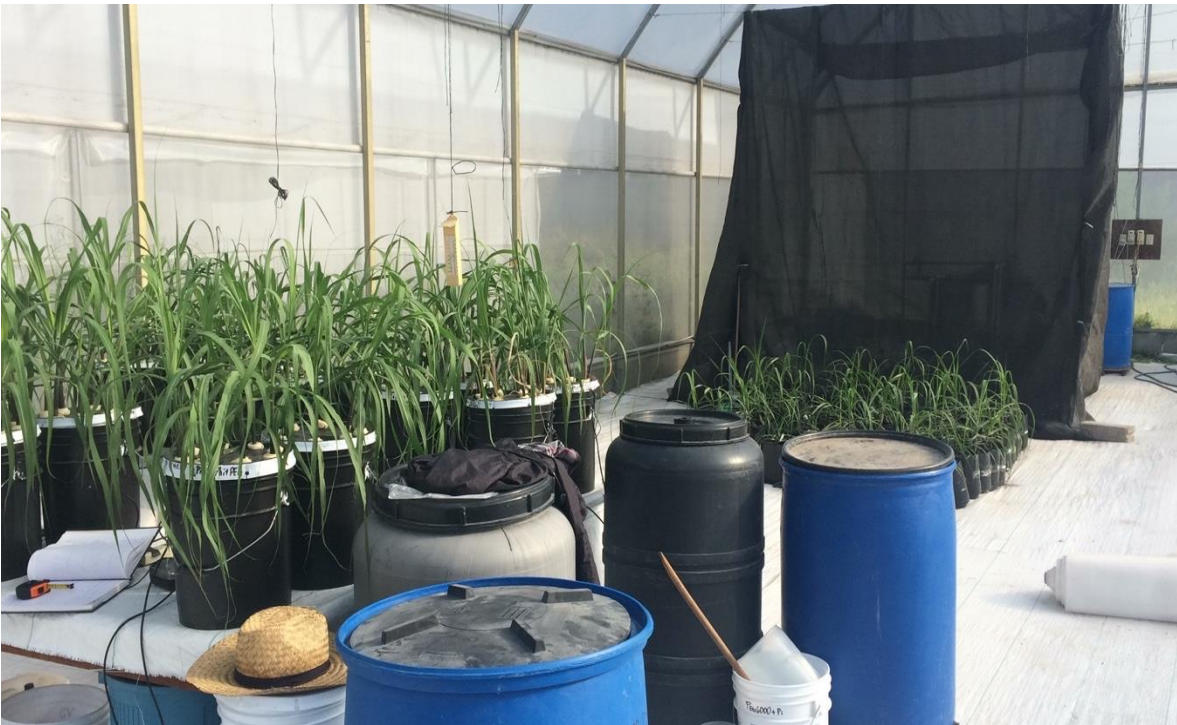
### **2.5.2. Material vegetal**

Se utilizaron tres cultivares de vitroplantas de caña de azúcar: CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204.

### **2.5.3. Manejo del experimento**

Las vitroplantas se aclimataron durante un periodo aproximado de dos meses y medio en charolas de polietileno de 72 cavidades con un volumen de 40 mL, utilizando una mezcla de turba y agrolita (1:1, v/v) como sustrato. Posteriormente, se trasplantaron a bolsas de polietileno negro con un volumen de 5 L, rellenas con tezontle rojo como sustrato previamente desinfectado (1 mL hipoclorito de sodio por 1 L de agua) (**Figura**

2.1). Durante este periodo las plantas se regaron cuatro veces al día: 09:00, 12:00, 15:00 y 18:00 h por 4 min con una solución nutritiva de Steiner (SNS) al 10% de concentración (Steiner, 1984), con un sistema de riego por goteo de 4 L h<sup>-1</sup> a distribuidores de cuatro salidas, una bomba de ½ HP y temporizador de la marca Steren.



**Figura 2. 1.** Manejo experimento investigación caña de azúcar

Los tratamientos iniciaron el día 07 de septiembre y finalizaron 27 días después, durante ese periodo las plantas se regaron ocho veces al día: 08:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00 y 18:00 h por 8 min con SNS al 35% de concentración (alternando riegos en días nublados).

#### 2.5.4. Descripción de tratamientos

Apoiados en los resultados del análisis de agua de pozo del invernadero ( $\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$ ): 0.2000  $\text{NO}_3^-$ , 0.0064  $\text{H}_2\text{PO}_4$ , 0.9057  $\text{SO}_4^{2-}$ , 0.1346  $\text{K}^+$ , 1.3013  $\text{Ca}^{2+}$ , 1.7060  $\text{Mg}^{2+}$  y empleando sales grado reactivo de las marcas Fermont, Meyer y J. T. Baker se ajustó la SNS a una concentración de 35% (**Cuadro 2.1**).

**Cuadro 2. 1.** Solución nutritiva universal de Steiner a 35% de su concentración.

Fuente	$\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$	$\text{g L}^{-1}$
Nitrato de calcio tetrahidratado [ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ]	3.15	0.3719
Sulfato de magnesio heptahidratado [ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ]	1.40	0.1725
Fosfato monobásico de potasio [ $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ]	0.35	0.0476
Nitrato de potasio [ $\text{KNO}_3$ ]	1.05	0.1061
Sulfato de potasio [ $\text{K}_2\text{SO}_4$ ]	1.05	0.0914

Se utilizó el producto comercial Tradecorp AZ como fuente de micronutrientes suministrando en  $\text{mg L}^{-1}$ : 4.988 Fe, 2.328 Mn, 0.466 Zn, 0.186 Cu, 0.432 B y 0.173 Mo. El pH de las soluciones nutritivas se calibró utilizando un medidor portátil de pH, conductividad eléctrica y temperatura (mod. PC18, México) y fue ajustado a 5.5 utilizando NaOH 1 N o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1 N.

Se evaluaron 6 tratamientos provenientes de la combinación de dos factores de estudio: Fosfito e intensidad luminosa.

El factor intensidad luminosa tuvo dos niveles: Suficiencia y deficiencia. Para el nivel de deficiencia de luz, se utilizó malla sombra de monofilamento negro calibre 50%.

El factor fosfito ( $\text{Phi}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ) fue suministrado en la solución nutritiva a partir de ácido fosforoso ( $\text{H}_3\text{PO}_3$ , Sigma Aldrich-Merck, Alemana), y se evaluaron los niveles siguientes:

0, 0.037 y 0.070 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>, estas concentraciones corresponden a 0, 10 y 20% del P total como fosfato en la SNS al 35%.

### **2.5.5. Diseño experimental**

Se utilizó un acomodo de tipo factorial 2 × 3 en un diseño experimental completamente al azar (DECA), en el que los factores a evaluar fueron:

Factor estrés: Sin estrés y estrés por sombra (malla monofilamento negro 50%).

Factor bioestimulante: Sin bioestimulante y con dos niveles de bioestimulante a partir de H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub> adicionado a la solución nutritiva.

Se obtuvieron seis tratamientos del acomodo factorial y un mínimo de 5 plantas, la unidad experimental consistió en una bolsa de plástico negro con capacidad de 4 L, logrando un total de 30 individuos muestra por cultivar de vitroplantas de caña de azúcar.

### **2.5.6. Variables evaluadas**

#### **A) Parámetros de crecimiento**

Fueron evaluados 27 días después de la aplicación de tratamientos mediante las variables siguientes:

- Número de hojas.
- Durante los 27 días de tratamientos cada 24 h se midió el largo y ancho de la hoja seleccionada para cinética de crecimiento con ayuda de una cinta métrica de 3 m de longitud (Truper, México). Estas mediciones se realizaron a la misma hora y en la hoja seleccionada, se registró el crecimiento, capturando el largo y el ancho de la hoja de caña,
- Altura de planta en cm al último anillo visible del tallo.
- Diámetro de tallo en mm con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, México).
- Área foliar por planta en cm<sup>2</sup> con un integrador (LI-3100C, LI-COR, Lincoln, NE, EEUU).
- Pesos de biomásas frescas de raíz, tallo y hoja en gramos empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).



- Pesos de biomásas secas de raíz, tallo y hoja en gramos. Se determinó en muestras secadas durante 72 h a 70°C en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, México), empleando una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).
- Curva de crecimiento de las hojas de caña de azúcar. Durante cada día de tratamiento, a las 16:00 h y en la hoja de caña menos desarrollada, se registró el crecimiento, capturando el largo y el ancho con una cinta métrica de 3 m de longitud (Truper, México), deteniendo la toma de mediciones cuando es una hoja madura o el registro de largo y ancho se reporta constante. Al final con ayuda de un integrador (LI-3100C, LI-COR, Lincoln, NE, EEUU) se capturó el área foliar final, posteriormente, mediante una regresión lineal se generó el modelo de crecimiento y se graficaron las lecturas tomadas durante todos los días de tratamiento.

## **B) Concentración de nutrimentos**

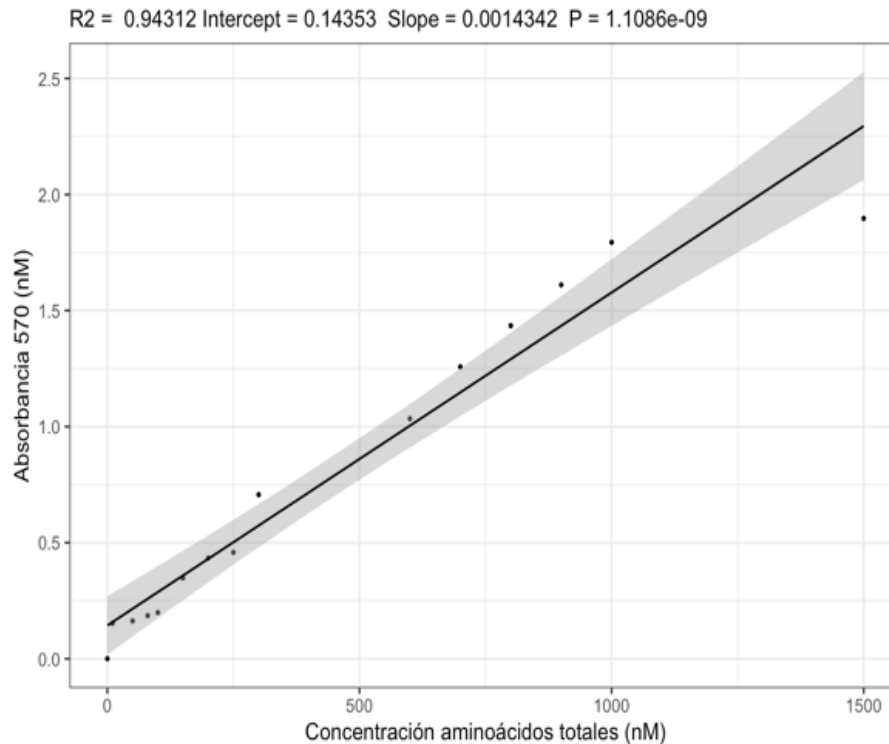
Se determinó la concentración de N en los distintos órganos de la planta (raíz, tallo y hoja), empleando el método Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965). La concentración de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo y B se determinó en el extracto resultante de la digestión húmeda del material seco con HNO<sub>3</sub> y HClO<sub>4</sub>, de acuerdo con lo descrito por (Alcántar-González & Sandoval-Villa, 1999). Los extractos se leyeron en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma Varian 725 ES ICP (Agilent, ICP Optical Emission Spectrometer, 725-ES, USA).

## **C) Contenido de clorofilas y aminoácidos**

Después de 27 d de tratamiento las muestras de raíz, tallo y hoja de plantas de caña de azúcar se almacenaron a una temperatura de -80 °C en un ultracongelador (Thermo Fisher Scientific - Forma 700 Series, Model: 703, Marietta, OH; EEUU). En estas muestras se realizaron las siguientes determinaciones:

- Concentración foliar de clorofila a, b, total y carotenos por la metodología descrita en el Capítulo I.

- Aminoácidos libres totales en hoja por la metodología descrita en el Capítulo I (Figura 2.2).



**Figura 2. 2.** Curva estándar para cuantificar aminoácidos totales.

#### **D) Parámetros fotosintéticos**

Los parámetros fotosintéticos se evaluaron a los 24 d de tratamiento con ayuda de un medidor de fotosíntesis (LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE; EEUU) entre 11:30 y 14:30 h (Cuadros 2.2 y 2.3), en la hoja madura más joven para obtener la tasa fotosintética máxima:

- Tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- Concentración intracelular de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ )
- Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

**Cuadro 2. 2.** Datos climáticos condiciones suficiencia de luz al momento de realizar lecturas de fotosíntesis.

Semana	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)
	media	media (11-14 h)	Punto rocío	
1	20.62	35.10	10.19	58.67
2	21.80	36.89	10.58	57.15
3	22.24	38.46	10.68	57.35
4	20.69	33.78	10.14	59.20

**Cuadro 2. 3.** Datos climáticos condiciones de deficiencia de luz al momento de realizar lecturas de fotosíntesis.

Semana	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)
	media	media (11-14 h)	Punto rocío	
1	18.76	28.13	7.56	53.83
2	19.49	28.54	7.89	53.50
3	20.00	30.25	7.59	51.19
4	19.21	28.10	6.91	50.14

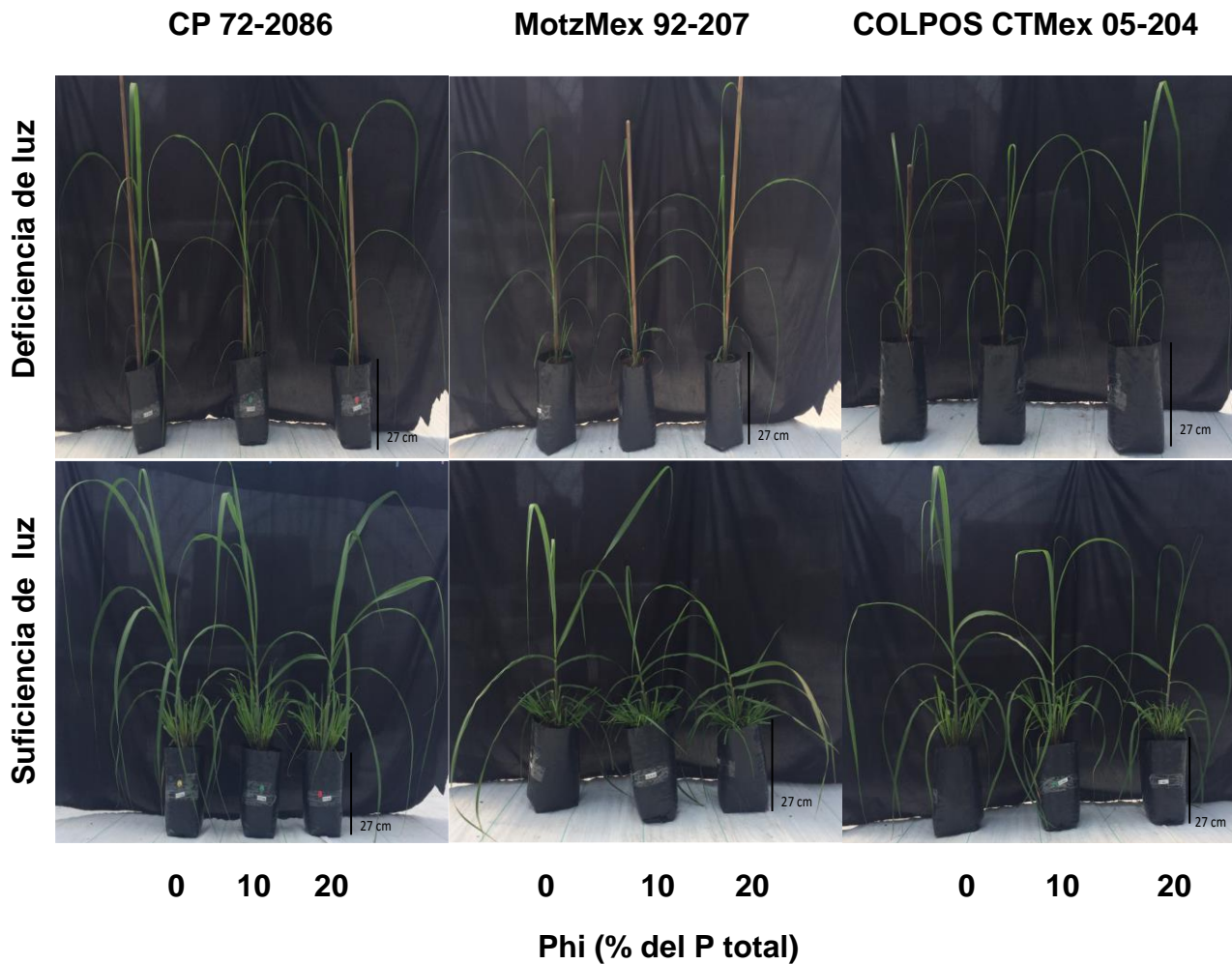
### 2.5.7. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizaron 3 muestras biológicas por tratamiento. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA; Univariado modelo lineal generalizado), una prueba de comparación de medias de Tukey donde los resultados con ( $P$ -value <0.05) se considera significativos utilizando el software SAS OnDemand for Academics (SAS Institute Inc., USA). Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) en hojas de los tres cultivares de caña utilizando la librería FactoMineR del software Rstudio v.1.2.1335 (R Core Team, 2018).

## 2.6 RESULTADOS

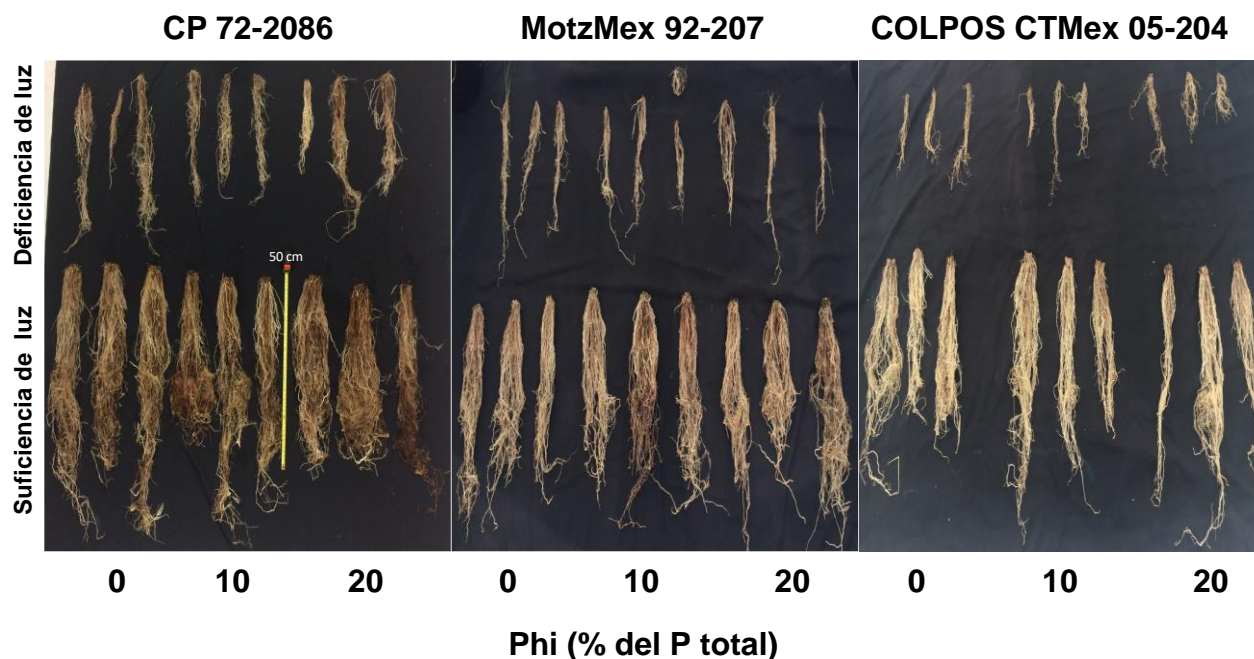
### 2.6.1. Parámetros de crecimiento

De manera visual se aprecia que, en condiciones de estrés por deficiencia de luz, las plantas de los tres cultivares de caña redujeron significativamente la producción de tallos secundarios (hijos o macollos) (**Figura 2.3**).



**Figura 2. 3.** Plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito ( $\text{Phi}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$ ).

En situación de estrés por falta de luz, se aprecia una reducción significativa en la producción de biomasa fresca de raíz (**Figura 2.4**).



**Figura 2. 4.** Raíces de plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito (Phi,  $H_2PO_3^-$ ).

En situación de estrés causado por deficiencia de luz, se observó una reducción general en las variables de crecimiento evaluadas, a excepción de la variable altura planta, la cual, se incrementó en los tres cultivares de caña de azúcar (**Cuadros 2.4, 2.5 y 2.6**).

En el cultivar CP 72-2086 se observó que la deficiencia de luz redujo el área foliar en 33.6%, respecto a la suficiencia de luz; asimismo, disminuyó en 54.1% el peso de biomasa seca aérea. Esta tendencia en la reducción de la biomasa seca por la falta de luz se observó también en tallos, hojas y raíces (**Cuadro 2.4**).

Se observa que el aporte de Phi como bioestimulante, incrementó significativamente en un 20.8% el área foliar a una concentración de Phi al 10%, y en un 60.6 y 108.8% el peso fresco de raíz en plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207 (**Cuadro 2.5**)

Asimismo, en el cv. MotzMex 92-207 se observó que en condiciones de luz, la adición de Phi como bioestimulante a concentraciones de 10 y 20%, incrementó

significativamente el área foliar en 19.4 y 30.4%, la biomasa seca aérea en 12.7 y 34.6%, el peso de la biomasa fresca de hojas en 17.0 y 31.1%, el peso de biomasa seca de hoja en 17.7 y 35.4% y el peso de biomasa fresca de raíz en un 79. y 144.0% (**Cuadro 2.5**).

Por otra parte, el Phi en concentraciones de 10 y 20% del P total, causó una reducción del 14.1 y 20.9% en el diámetro de tallo en plantas de caña de azúcar del cv. COLPOSCTMex 05-204 (**Cuadro 2.6**).

**Cuadro 2. 4.** Variables de crecimiento registradas en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Ø de tallo (mm)</b>	<b>Área foliar (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	27.22 ± 2.3 b	19.35 ± 2.7 a	930.16 ± 164.3 a
Deficiencia	32.39 ± 2.5 a	12.06 ± 0.9 b	617.34 ± 92.4 b
Pr(>F)	0.0008	<0.0001	0.0002
<b>Phi, % del P total</b>			
0	29.42± 3.7a	15.91±4.0a	766.97±206.1a
10	29.58± 4.1a	15.55±5.7a	703.38±195.7a
20	30.42± 3.3a	15.66±3.5a	850.90±225.9a
Pr(>F)	0.7560	0.9579	0.1807
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	26.33± 2.0ab	19.50±1.3a	931.12±106.8ab
Suficiencia + 10	26.17±2.0b	19.98±4.6a	816.20±239.2ab
Suficiencia + 20	29.17±2.1ab	18.57±1.9ab	1043.17±27.2a
Deficiencia + 0	32.50±1.3ab	12.31±0.5c	602.82±118.0b
Deficiencia + 10	33.00±1.8a	11.12±0.2c	590.56±18.5b
Deficiencia + 20	31.67±4.3ab	12.75±0.9bc	658.64±126.3b
Pr(>F)	0.0136	0.0004	0.0042
<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca aérea(g)</b>	<b>Biomasa fresca de hoja (g)</b>	<b>Biomasa seca de hoja (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	11.34 ± 2.3 a	34.73±6.5a	7.39±1.4a
Deficiencia	5.20 ± 0.6 b	18.41±2.9b	3.34±0.4b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	8.18±3.4a	26.56±10.3a	5.42±2.5a
10	7.26±3.3a	24.18±9.7a	4.75±2.1a
20	9.36±4.2a	28.98±10.4a	5.92±2.6a
Pr(>F)	0.0908	0.3110	0.1378
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	11.27±0.4a	35.29±5.0a	7.59±0.9a
Suficiencia + 10	9.71±2.9ab	30.86±10.0ab	6.38±1.8a
Suficiencia + 20	13.10±1.9a	38.04±2.7a	8.19±0.9a
Deficiencia + 0	5.09±0.6c	17.82±3.6b	3.25±0.5b
Deficiencia + 10	4.81±0.3c	17.49±0.8b	3.11±0.2b
Deficiencia + 20	5.69±0.8bc	19.93±3.9b	3.66±0.5b
Pr(>F)	<0.0001	0.0136	0.0004

<b>Factor</b>	<b>Biomasa fresca de tallo (g)</b>	<b>Biomasa seca de tallos (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	34.57±8.9a	3.95±1.1a
Deficiencia	18.05±2.4b	1.85±0.2b
Pr(>F)	0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	24.65±8.8a	2.76±1.1a
10	23.75±10.6a	2.51±1.1a
20	30.52±12.7a	3.43±1.7a
Pr(>F)	0.1664	0.0898
<b>IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	31.48±6.9ab	3.68±0.5ab
Suficiencia + 10	30.86±11.4ab	3.33±1.1abc
Suficiencia + 20	41.35±6.1a	4.84±1.1a
Deficiencia + 0	17.82±2.1b	1.83±0.2bc
Deficiencia + 10	16.65±1.4b	1.70±0.1c
Deficiencia + 20	19.65±3.3b	2.02±0.3bc
Pr(>F)	0.0042	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Biomasa fresca de raíz (g)</b>	<b>Biomasa seca de raíz (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	116.95±37.1a	15.94±6.1a
Deficiencia	7.85±3.0b	0.94±0.4b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	76.87±76.6a	11.19±11.5a
10	46.26±47.7a	5.98±6.3a
20	64.06±64.9a	8.15±8.6a
Pr(>F)	0.0891	0.0633
<b>IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	145.67±21.5a	21.34±4.4a
Suficiencia + 10	86.17±30.1a	11.19±4.2b
Suficiencia + 20	119.00±38.2a	15.28±5.7ab
Deficiencia + 0	8.07±4.7b	1.04±0.6c
Deficiencia + 10	6.34±1.5b	0.76±0.2c
Deficiencia + 20	9.12±2.4b	1.01±0.2c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).



**Cuadro 2. 5.** Variables de crecimiento registradas en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Ø de tallo (mm)</b>	<b>Área foliar (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	22.08±1.2b	16.31±1.3a	750.17±108.4a
Deficiencia	30.90±1.9a	11.68±0.8b	470.02±67.4b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	26.39±5.0a	13.65±2.5a	539.50±124.2b
10	26.93±6.1a	13.95±1.9a	651.80±151.5a
20	26.15±4.0a	14.39±3.5a	638.99±221.9ab
Pr(>F)	0.6460	0.3961	0.0236
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	22.11±1.0b	15.91±0.4a	643.43±2.1bc
Suficiencia + 10	21.43±0.4b	15.54±1.0a	768.14±125.5ab
Suficiencia + 20	22.70±1.9b	17.49±1.4a	838.92±42.7a
Deficiencia + 0	30.67±2.4a	11.39±0.7b	435.56±78.6d
Deficiencia + 10	32.43±1.2a	12.36±0.8b	535.46±32.4cd
Deficiencia + 20	29.60±1.0a	11.29±0.8b	439.05±36.2d
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca aérea(g)</b>	<b>Biomasa fresca de hoja (g)</b>	<b>Biomasa seca de hoja (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	9.56±1.7a	28.88±4.1a	6.60±1.1a
Deficiencia	4.51±0.8b	14.56±2.5b	2.92±0.5b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	6.21±2.3a	19.41±6.3a	4.14±1.7a
10	7.29±2.4a	22.93±7.3a	5.02±1.8a
20	7.61±4.0a	22.83±10.9a	5.12±2.8a
Pr(>F)	0.0688	0.0437	0.0435
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	8.26±0.3b	24.89±0.9b	5.61±0.3b
Suficiencia + 10	9.31±1.3ab	29.13±3.5ab	6.60±1.0ab
Suficiencia + 20	11.12±1.7a	32.63±3.0a	7.59±1.0a
Deficiencia + 0	4.16±0.8c	13.93±2.6c	2.67±0.5c
Deficiencia + 10	5.28±0.5c	16.72±2.2c	3.44±0.3c
Deficiencia + 20	4.10±0.4c	13.04±1.1c	2.64±0.1c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001

<b>Factor</b>	<b>Biomasa fresca de tallo (g)</b>	<b>Biomasa seca de tallos (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	22.40±3.5a	2.96±0.6a
Deficiencia	15.26±2.8b	1.59±0.3b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	17.25±4.0a	2.07±0.7a
10	19.37±2.0a	2.27±0.6a
20	19.86±7.4a	2.49±1.2a
Pr(>F)	0.1315	0.2047
<b>IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	20.46±1.4ab	2.65±0.1ab
Suficiencia + 10	20.52±1.9ab	2.71±0.5ab
Suficiencia + 20	26.22±3.3a	3.52±0.7a
Deficiencia + 0	14.05±2.5c	1.48±0.3c
Deficiencia + 10	18.21±1.7bc	1.83±0.2bc
Deficiencia + 20	13.50±1.7c	1.46±0.2c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Biomasa fresca de raíz (g)</b>	<b>Biomasa seca de raíz (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	58.11±26.8a	12.81±3.1a
Deficiencia	8.52±2.3b	1.09±0.3b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	21.29±13.3b	5.72±4.9a
10	34.20±30.7ab	7.49±7.5a
20	44.45±43.9a	7.63±7.5a
Pr(>F)	0.0412	0.2236
<b>IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	33.33±1.5bc	10.20±0.5a
Suficiencia + 10	59.67±20.0ab	13.92±4.1a
Suficiencia + 20	81.33±27.0a	14.31±2.6a
Deficiencia + 0	9.24±1.1c	1.23±0.3b
Deficiencia + 10	8.74±2.5c	1.07±0.3b
Deficiencia + 20	7.58±3.3c	0.96±0.4b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 2. 6.** Variables de crecimiento registradas en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Ø de tallo (mm)</b>	<b>Área foliar (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	28.06±5.7a	14.02±2.4a	751.28±222.7a
Deficiencia	29.89±2.5a	8.76±1.3b	292.08±67.4b
Pr(>F)	0.2854	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	31.33±2.6a	12.89±3.4a	602.60±303.5a
10	28.83±2.8a	11.07±3.8ab	516.04±331.6a
20	26.75±6.1a	10.20±2.5b	446.40±244.1a
Pr(>F)	0.1144	0.0274	0.2466
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	31.00±4.1a	15.83±1.3a	862.95±154.5a
Suficiencia + 10	30.50±2.3a	14.45±1.1a	807.45±132.2a
Suficiencia + 20	22.67±6.5a	11.78±2.8ab	583.43±302.3ab
Deficiencia + 0	31.67±0.6a	9.95±1.3b	342.26±55.7b
Deficiencia + 10	27.17±2.5a	7.70±1.0b	224.63±51.9b
Deficiencia + 20	30.83±1.3a	8.62±0.5b	309.37±36.1b
Pr(>F)	0.0560	0.0001	0.0008
<b>Factor</b>	<b>Biomasa seca aérea (g)</b>	<b>Biomasa fresca de hoja (g)</b>	<b>Biomasa seca de hoja (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	7.74±2.9a	25.14±8.7a	5.15±1.8a
Deficiencia	2.45±0.6b	7.91±1.9b	1.54±0.4b
Pr(>F)	0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	6.08±3.8a	19.58±12.1a	3.88±2.4a
10	4.99±3.6a	16.58±11.9a	3.29±2.4a
20	4.22±3.0a	13.41±9.2a	2.86±2.1a
Pr(>F)	0.3212	0.2355	0.4202
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	9.26±2.4a	29.96±6.3a	5.98±1.3a
Suficiencia + 10	8.09±1.9ab	26.87±5.8a	5.37±1.3a
Suficiencia + 20	5.87±3.8abc	18.60±11.3ab	4.11±2.6b
Deficiencia + 0	2.89±0.6bc	9.21±1.9b	1.80±0.4b
Deficiencia + 10	1.88±0.5c	6.29±1.8b	1.20±0.3b
Deficiencia + 20	2.57±0.3bc	8.23±0.9b	1.62±0.2b
Pr(>F)	0.0028	0.0010	0.0019

<b>Factor</b>	<b>Biomasa fresca de tallo (g)</b>	<b>Biomasa seca de tallos</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	23.76±10.0a	2.59±1.1a
Deficiencia	8.46±2.3b	0.91±0.2b
Pr(>F)	0.0003	0.0006
<b>Phi, % del P total</b>		
0	20.11±12.3a	2.19±1.4a
10	16.23±11.2a	1.70±1.2a
20	11.98±8.0a	1.36±0.9a
Pr(>F)	0.1334	0.2084
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	29.79±9.6a	3.28±1.2a
Suficiencia + 10	25.99±5.0ab	2.73±0.6ab
Suficiencia + 20	15.49±11.1abc	1.77±1.3ab
Deficiencia + 0	10.42±1.7bc	1.10±0.2b
Deficiencia + 10	6.48±2.2c	0.67±0.2b
Deficiencia + 20	8.48±1.1bc	0.95±0.1b
Pr(>F)	0.0032	0.0067
<b>Factor</b>	<b>Biomasa fresca de raíz (g)</b>	<b>Biomasa seca de raíz (g)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	40.38±16.0a	7.59±2.2a
Deficiencia	4.36±1.4b	0.47±0.2b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	26.45±25.7a	4.48±4.4a
10	22.68±24.1a	4.34±4.8a
20	17.97±17.3a	3.28±3.2a
Pr(>F)	0.4683	0.3556
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	47.99±16.0a	8.45±1.2a
Suficiencia + 10	42.34±17.0a	8.34±3.0a
Suficiencia + 20	30.79±15.9ab	5.99±1.7a
Deficiencia + 0	4.90±1.3b	0.50±0.1b
Deficiencia + 10	3.02±0.6b	0.34±0.0b
Deficiencia + 20	5.15±1.1b	0.57±0.2b
Pr(>F)	0.0008	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### **2.6.2. Concentración nutrimental en hoja cv. CP 72-2086**

En el cv. CP 72-2086 la situación de estrés por deficiencia de luz ocasionó la reducción significativa en la concentración foliar de Ca, Mg, Cu, Mn y B en 17.9, 25.8, 12.7, 15.5 y 10.2%; por el contrario, incrementó la concentración en hojas de N, P, K y Fe en 7, 22.1, 33.7 y 17% (**Cuadro 2.7**).

Asimismo, en el cv. CP 72-2086 se observa que el aporte de 10% del P total como Phi, incrementó significativamente la concentración foliar de K, Mg y Mn en 8.9, 7.9 y 23.9%; mientras que, el aporte del 20% del P total como Phi aumentó la concentración foliar de P, Ca, Zn y B en 17.2, 11, 32.7 y 4.7%. Por otro lado, el Phi a dosis equivalentes al 20% del P total, redujo significativamente la concentración de N en 28.5% (**Cuadro 2.7**).

Por otro lado, en condiciones de luz, la adición de Phi correspondiente al 10% del P total, incrementó significativamente la concentración foliar de Mg en un 53.9% a una dosis de 10% y la concentración de Ca en 10.5%. El incremento de Phi a 20% del P total, tuvo efectos negativos en la concentración foliar de N, con decrementos de 50.2%. En condiciones de deficiencia de luminosidad, la concentración de Phi correspondiente a 20% del P total, incrementó significativamente la concentración foliar de P y Zn en 9.8 y 46.2% (**Cuadro 2.7**).

### **2.6.3. Concentración nutrimental en hoja cv. MotzMex 92-207**

En plantas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207, la situación de estrés por insuficiencia de luz, se observó una reducción significativa en la concentración foliar de Ca, Mg, Zn, Mn y B en 12.8, 18.7, 36.8, 5.4 y 8.5% e incrementó la concentración foliar de P, K y Fe en un 11.1, 27.3 y 49.2% (**Cuadro 2.8**).

Se observó en el cv. MotzMex 92-207 que, el aporte de Phi como bioestimulante en concentración de 10% del P total incrementó significativamente la concentración foliar de K y Mn en un 9 y 14.6%; así también la dosis de Phi equivalente al 20% del P total aumentó la concentración foliar de Fe en 19.9%. Por otro lado, dosis de Phi correspondiente al 10% del P total, redujo significativamente la concentración foliar de N en 10.8% (**Cuadro 2.8**).

En el **Cuadro 2.8**, se aprecia que en el cv. MotzMex 92-207 en condiciones de luz, la adición de 10% del P total como Phi, incrementó significativamente la concentración foliar de Mg y Mn en 15.7 y 21.1% y redujo la concentración foliar de N y Fe en 26 y 18%; mientras que, el incremento al 20% causó un decremento de 14.2% la concentración foliar de Fe. En condiciones de insuficiencia lumínica con Phi equivalente al 10% del P total, se incrementó significativamente la concentración de K y Fe en hojas en 14.8 y 21.8%; de la misma manera, la concentración de Fe se aumento en 51.9% al 20% del P total como Phi.

#### **2.6.4. Concentración nutrimental en hoja cv. COLPOS CTMex 05-204**

En hojas de plantas de caña de azúcar del cv. COLPOS CTMex 05-204 se observó que, el aporte de Phi correspondiente al 20% del P total como bioestimulante, incrementó significativamente la concentración de Zn y Mn en 22.3 y 7.1%. Por otro lado, el tratamiento con Phi a una dosis equivalente al 10% del P total redujo significativamente la concentración foliar de Mn y Fe en 11.7 y 27.1%; de la misma manera, el aumento al 20% del P total como Phi causó decremento en la concentración de Fe en 17.9% (**Cuadro 2.9**).

En el **Cuadro 2.9**, se aprecia que, en el cv. COLPOS CTMex 05-204 en condiciones de luz, la adición de Phi correspondiente al 10% del P total como bioestimulante, incrementó significativamente la concentración foliar de K y Mg en 18.6 y 6% y redujo la concentración foliar de Ca y Fe en 9.9 y 39%. Asimismo, con suficiencia de luz y 20% de P del total como Phi se aumentó la concentración foliar de Zn y Mn en 29.4 y 30.8%; mientras que la de Fe se redujo en 33.6%. En condiciones de sombra, la adición de Phi correspondiente al 10 y 20% del P total, causó incrementos en la concentración de Mn en 22.3 y 17.7%.

**Cuadro 2. 7.** Concentración foliar de nutrimentos en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>				
Suficiencia	19.63±6.0b	1.63±0.1b	8.25±1.0b	3.92±0.2a
Deficiencia	21.00±1.0a	1.99±0.1a	11.03±0.7a	3.22±0.2b
Pr(>F)	0.0038	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>				
0	22.42±1.6a	1.75±0.2b	9.58±1.6b	3.38±0.4b
10	22.49±1.6a	1.77±0.2b	10.43±1.3a	3.57±0.4ab
20	16.03±4.7b	1.91±0.2a	8.91±1.8b	3.75±0.4a
Pr(>F)	<0.0001	0.0003	0.0004	0.0012
<b>IL + Phi</b>				
Suficiencia + 0	23.75±0.4a	1.57±0.0c	8.14±0.5cd	3.70±0.2bc
Suficiencia + 10	23.45±1.6a	1.62±0.0c	9.25±0.3bc	3.95±0.1ab
Suficiencia + 20	11.68±0.9c	1.69±0.1c	7.35±0.9d	4.09±0.2a
Deficiencia + 0	21.09±1.0b	1.94±0.1b	11.02±0.5a	3.05±0.1d
Deficiencia + 10	21.53±0.9ab	1.91±0.1b	11.61±0.5a	3.19±0.2d
Deficiencia + 20	20.39±0.9b	2.13±0.1a	10.46±0.7ab	3.41±0.1cd
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>				
Suficiencia	2.33±0.2a	67.83±3.6b	5.90±0.7a	21.04±2.2a
Deficiencia	1.73±0.1b	79.36±9.7a	5.15±0.5b	22.19±8.1a
Pr(>F)	<0.0001	0.0017	0.0023	0.5153
<b>Phi, % del P total</b>				
0	1.89±0.2b	75.14±11.1a	5.16±0.5a	19.67±4.4b
10	2.04±0.3a	74.00±6.8a	5.70±0.7a	19.08±3.7b
20	2.01±0.3ab	71.66±10.2a	5.72±0.7a	26.10±6.7a
Pr(>F)	0.0290	0.6583	0.0795	0.0064
<b>IL + Phi</b>				
Suficiencia + 0	2.09±0.0a	71.24±1.0a	5.50±0.3ab	18.72±0.5b
Suficiencia + 10	2.32±0.1a	68.30±2.6a	6.29±0.3a	22.35±1.3ab
Suficiencia + 20	2.29±0.2a	63.95±2.0a	5.92±1.0ab	22.35±2.1ab
Deficiencia + 0	1.69±0.1b	79.04±15.7a	4.82±0.3b	20.62±6.6b
Deficiencia + 10	1.77±0.1b	79.69±3.8a	5.10±0.4b	15.81±1.1b
Deficiencia + 20	1.73±0.1b	79.36±9.0a	5.52±0.4ab	30.14±7.5a
Pr(>F)	<0.0001	0.0352	0.0111	0.0040

<b>Factor</b>	<b>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>B (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	87.61±19.5a	53.30±1.7a
Deficiencia	74.05±6.0b	47.85±1.6b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	74.65±5.4b	49.53±3.1b
10	92.50±22.4a	50.36±3.2ab
20	75.34±6.7b	51.84±3.3a
Pr(>F)	<0.0001	0.0134
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	70.67±3.2b	52.42±0.4a
Suficiencia + 10	113.38±2.6a	52.83±2.0a
Suficiencia + 20	78.77±2.2b	54.65±1.5a
Deficiencia + 0	78.63±4.0b	46.63±0.5b
Deficiencia + 10	71.62±2.3b	47.89±1.8b
Deficiencia + 20	71.90±8.2b	49.02±1.4b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).



**Cuadro 2. 8.** Concentración foliar de nutrientes en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>				
Suficiencia	20.30±3.0a	1.90±0.1b	7.65±0.6b	2.98±0.1a
Deficiencia	21.22±1.0a	2.11±0.1a	9.74±0.7a	2.60±0.2b
Pr(>F)	0.0839	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>				
0	21.57±1.3a	2.02±0.1a	8.20±0.9b	2.82±0.2a
10	19.25±3.1b	1.97±0.1a	8.94±1.5a	2.77±0.3a
20	21.44±1.1a	2.03±0.2a	8.94±1.2a	2.77±0.3a
Pr(>F)	0.0017	0.4563	0.0222	0.7415
<b>IL + Phi</b>				
Suficiencia + 0	22.58±1.0a	1.97±0.1abc	7.47±0.7d	2.92±0.1a
Suficiencia + 10	16.71±1.7b	1.85±0.1c	7.64±1.0d	2.98±0.2a
Suficiencia + 20	21.61±1.6a	1.89±0.1c	7.83±0.2cd	3.04±0.1a
Deficiencia + 0	20.56±0.1a	2.08±0.1ab	8.92±0.4bc	2.72±0.2ab
Deficiencia + 10	21.79±1.5a	2.09±0.0ab	10.24±0.2a	2.56±0.2b
Deficiencia + 20	21.26±0.4a	2.17±0.1a	10.06±0.5ab	2.51±0.1b
Pr(>F)	<0.0001	0.0012	<0.0001	0.0002
<b>Factor</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>				
Suficiencia	1.66±0.1a	58.96±6.0b	5.97±0.3a	26.89±7.3a
Deficiencia	1.35±0.1b	87.97±16.6a	6.24±0.4a	16.99±2.4b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0626	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>				
0	1.46±0.1a	68.34±5.6b	6.24±0.4a	22.51±5.9a
10	1.55±0.3a	70.10±17.5b	6.24±0.4a	19.78±2.5a
20	1.49±0.2a	81.96±27.3a	5.84±0.3a	23.53±11.3a
Pr(>F)	0.2582	<0.0001	0.0464	0.2629
<b>IL + Phi</b>				
Suficiencia + 0	1.53±0.1bc	66.05±3.3cd	5.93±0.3ab	27.14±4.6ab
Suficiencia + 10	1.77±0.1a	54.16±3.3e	6.28±0.1ab	21.23±1.7bc
Suficiencia + 20	1.67±0.0ab	56.68±2.4de	5.68±0.2b	32.30±9.5a
Deficiencia + 0	1.40±0.1c	70.62±7.0c	6.55±0.3a	17.88±1.8bc
Deficiencia + 10	1.33±0.1c	86.03±5.5b	6.18±0.6ab	18.33±2.6bc
Deficiencia + 20	1.32±0.1c	107.25±5.2a	5.99±0.2ab	14.75±0.6c
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0321	0.0003

<b>Factor</b>	<b>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>B (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	88.97±8.8a	52.49±1.5a
Deficiencia	84.19±4.9b	48.02±1.6b
Pr(>F)	0.0236	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	81.15±3.2b	49.95±2.0a
10	92.99±7.3a	50.57±2.8a
20	85.60±5.8b	50.25±3.6a
Pr(>F)	0.0004	0.6718
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	80.12±2.6b	51.02±1.3ab
Suficiencia + 10	97.02±8.3a	52.97±1.3a
Suficiencia + 20	89.78±4.2ab	53.49±0.6a
Deficiencia + 0	82.18±3.9b	48.88±2.1bc
Deficiencia + 10	88.96±3.7ab	48.17±1.1bc
Deficiencia + 20	81.43±3.6b	47.02±1.3c
Pr(>F)	0.0006	<0.0001

Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 2. 9.** Concentración foliar de nutrientes en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

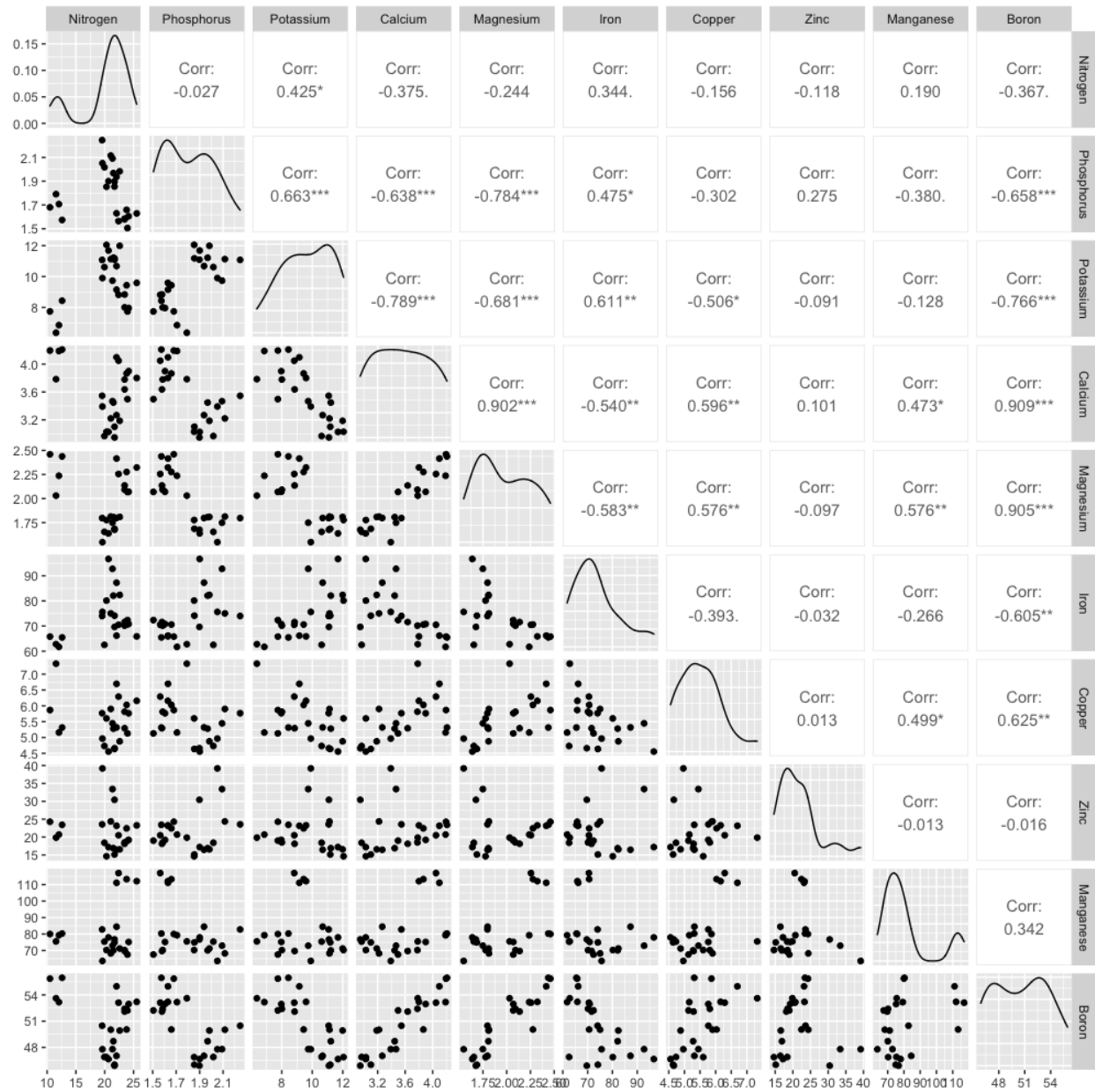
<b>Factor</b>	<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>				
Suficiencia	25.05±2.7a	1.83±0.0b	7.90±1.0b	3.53±0.2a
Deficiencia	21.64±1.9b	2.12±0.1a	9.43±0.5a	2.71±0.2b
Pr(>F)	0.0008	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>				
0	24.41±3.2a	1.96±0.2a	8.66±1.2ab	3.12±0.6a
10	22.66±3.0a	1.98±0.1a	9.06±0.4a	3.08±0.3a
20	22.97±2.3a	1.99±0.2a	8.27±1.4b	3.15±0.6a
Pr(>F)	0.2219	0.3755	0.0093	0.6516
<b>IL + Phi</b>				
Suficiencia + 0	27.21±1.5a	1.81±0.1b	7.62±0.3b	3.64±0.2a
Suficiencia + 10	24.68±1.1ab	1.86±0.0b	9.04±0.5a	3.28±0.1b
Suficiencia + 20	23.28±3.5ab	1.83±0.0b	7.06±0.5b	3.66±0.2a
Deficiencia + 0	21.61±1.0b	2.11±0.1a	9.71±0.5a	2.60±0.1c
Deficiencia + 10	20.65±2.9b	2.11±0.0a	9.08±0.5a	2.88±0.2c
Deficiencia + 20	22.65±0.4ab	2.16±0.1a	9.48±0.5a	2.65±0.1c
Pr(>F)	0.0042	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>				
Suficiencia	1.57±0.1a	87.46±22.1a	6.08±0.3a	16.60±2.2a
Deficiencia	1.16±0.0b	68.89±6.4b	5.88±0.6a	13.88±1.6b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.1907	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>				
0	1.36±0.2a	91.95±25.6a	6.13±0.3a	13.73±1.8b
10	1.37±0.2a	67.03±7.9b	5.69±0.4a	15.21±1.3ab
20	1.36±0.2a	75.52±6.7b	6.11±0.5a	16.79±2.8a
Pr(>F)	0.7701	<0.0001	0.0418	0.0010
<b>IL + Phi</b>				
Suficiencia + 0	1.51±0.0b	115.39±6.0a	6.21±0.3a	14.76±0.3bc
Suficiencia + 10	1.60±0.0a	70.40±8.9b	6.08±0.1ab	15.96±1.0b
Suficiencia + 20	1.58±0.1ab	76.58±9.5b	5.95±0.5ab	19.10±1.9a
Deficiencia + 0	1.20±0.1c	68.51±4.9b	6.06±0.4ab	12.70±2.1c
Deficiencia + 10	1.14±0.0c	63.68±6.1b	5.29±0.1b	14.45±1.2bc
Deficiencia + 20	1.14±0.0c	74.47±3.5b	6.28±0.6a	14.48±0.4bc
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0167	<0.0001

Factor	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>		
Suficiencia	100.30±14.5a	54.42±2.4a
Deficiencia	75.57±9.1b	47.15±1.2b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>		
0	89.30±3.4b	50.89±4.2a
10	78.88±12.2c	51.19±4.3a
20	95.63±25.7a	50.28±4.5a
Pr(>F)	<0.0001	0.6725
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>		
Suficiencia + 0	91.40±2.4b	54.29±2.9a
Suficiencia + 10	89.98±2.7b	54.56±3.5a
Suficiencia + 20	119.52±4.7a	54.42±1.0a
Deficiencia + 0	87.20±2.9b	47.49±1.2b
Deficiencia + 10	67.77±3.5c	47.81±0.9b
Deficiencia + 20	71.74±1.4c	46.15±1.1b
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001

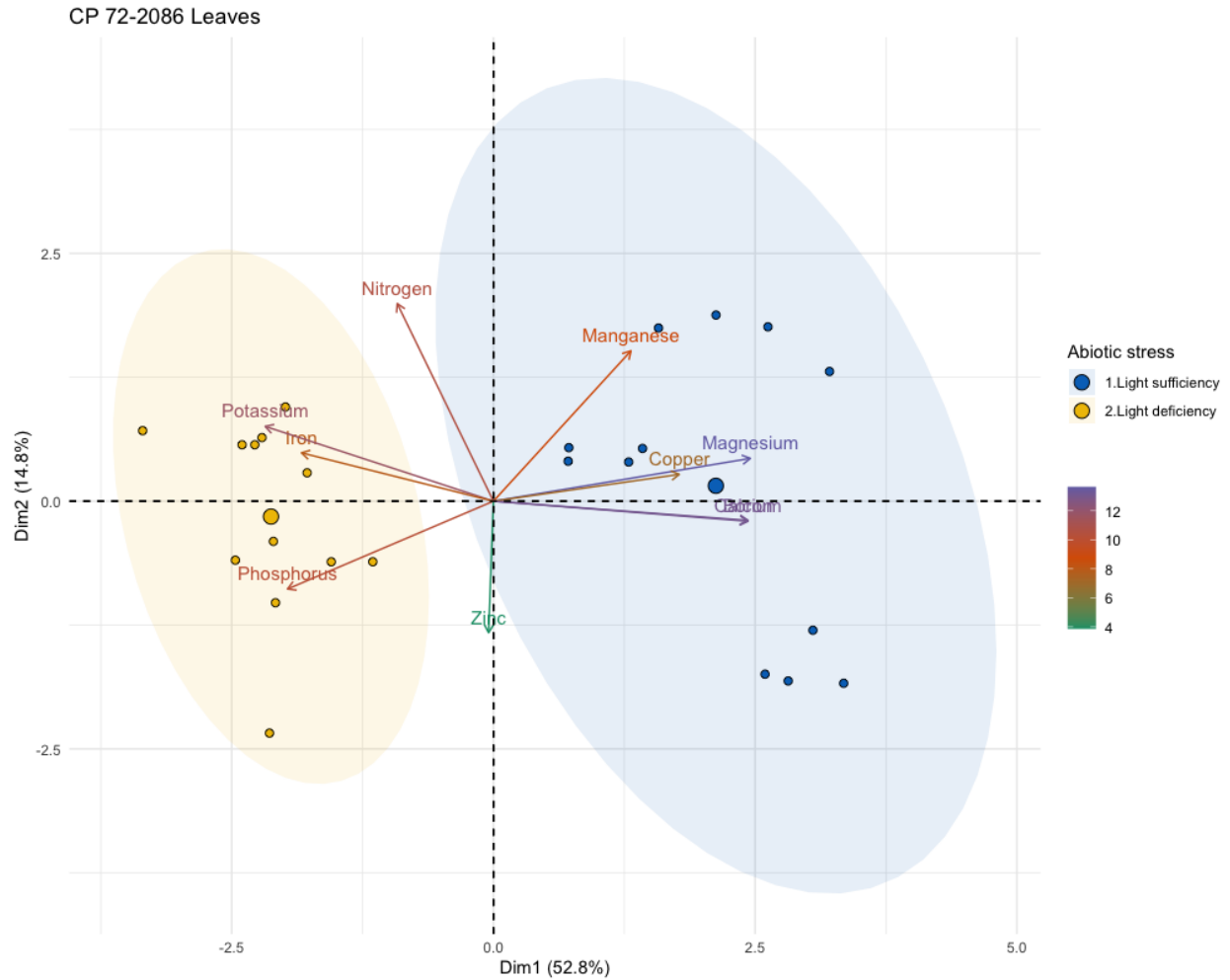
Medias ± DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### 2.6.5. Análisis de concentraciones foliares de nutrimentos con componentes principales

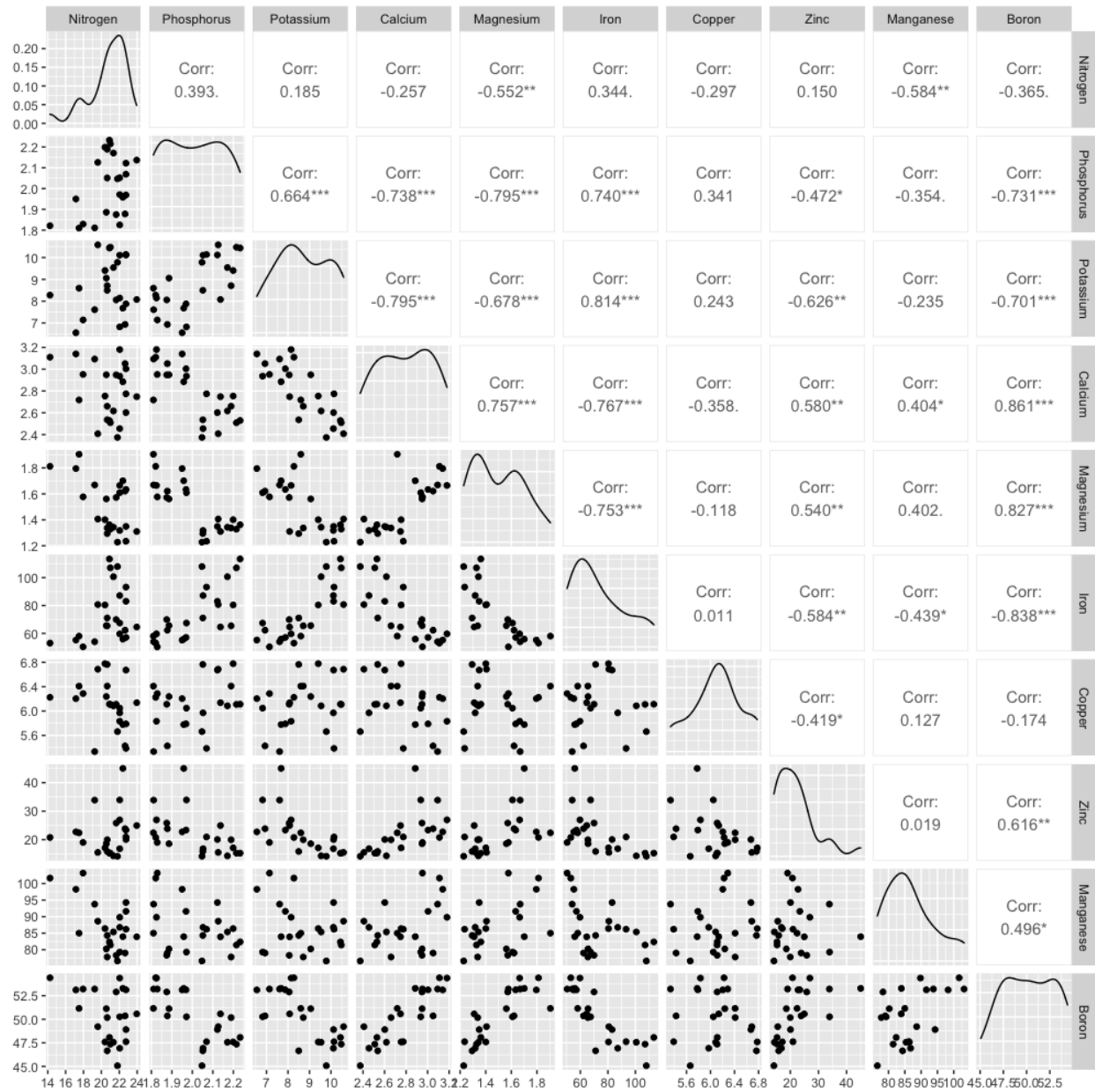
Se utilizó un análisis de componentes principales (PCA) con los datos de concentraciones foliares de nutrimentos, donde la suma del componente principal 1 y el componente principal 2 (Dim1+Dim2) representó, el 67.6, 75.6 y 77.6% de la varianza total en hojas de plantas de caña de azúcar de los cultivares CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204 sometidos a estrés abiótico. Así también, se corroboró la correlación entre los nutrimentos para cada cultivar de caña de azúcar y así apreciar el comportamiento de las determinaciones nutrimentales en hojas como respuesta al tratamiento sin estrés y estrés por deficiencia de luz (**Figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10**).



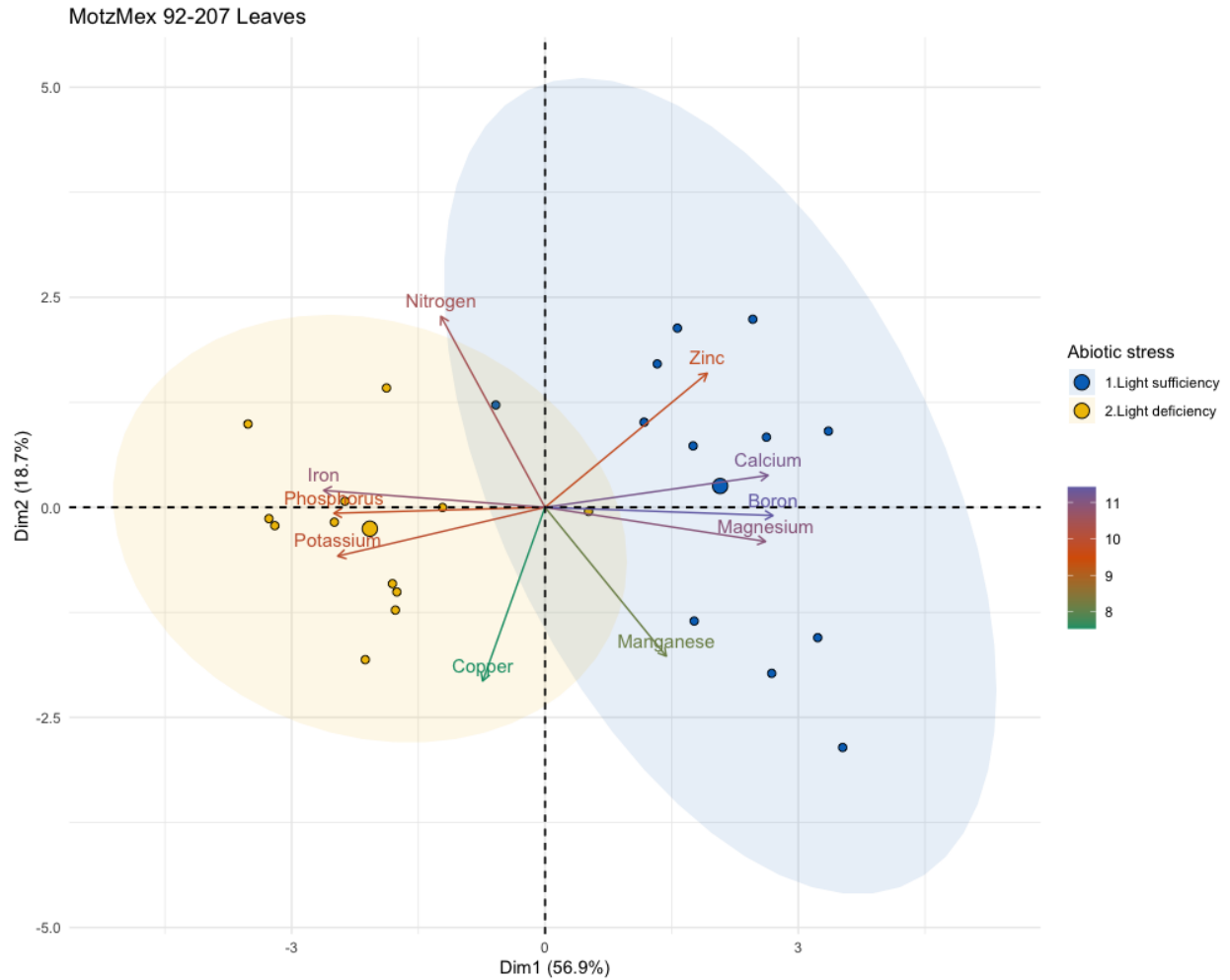
**Figura 2. 5.** Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086. \*\*\* = Significativo a  $P \leq 0.001$ ; \*\* = Significativo a  $P \leq 0.01$ ; \* = Significativo a  $P \leq 0.05$ .



**Figura 2. 6.** Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. CP 72-2086.

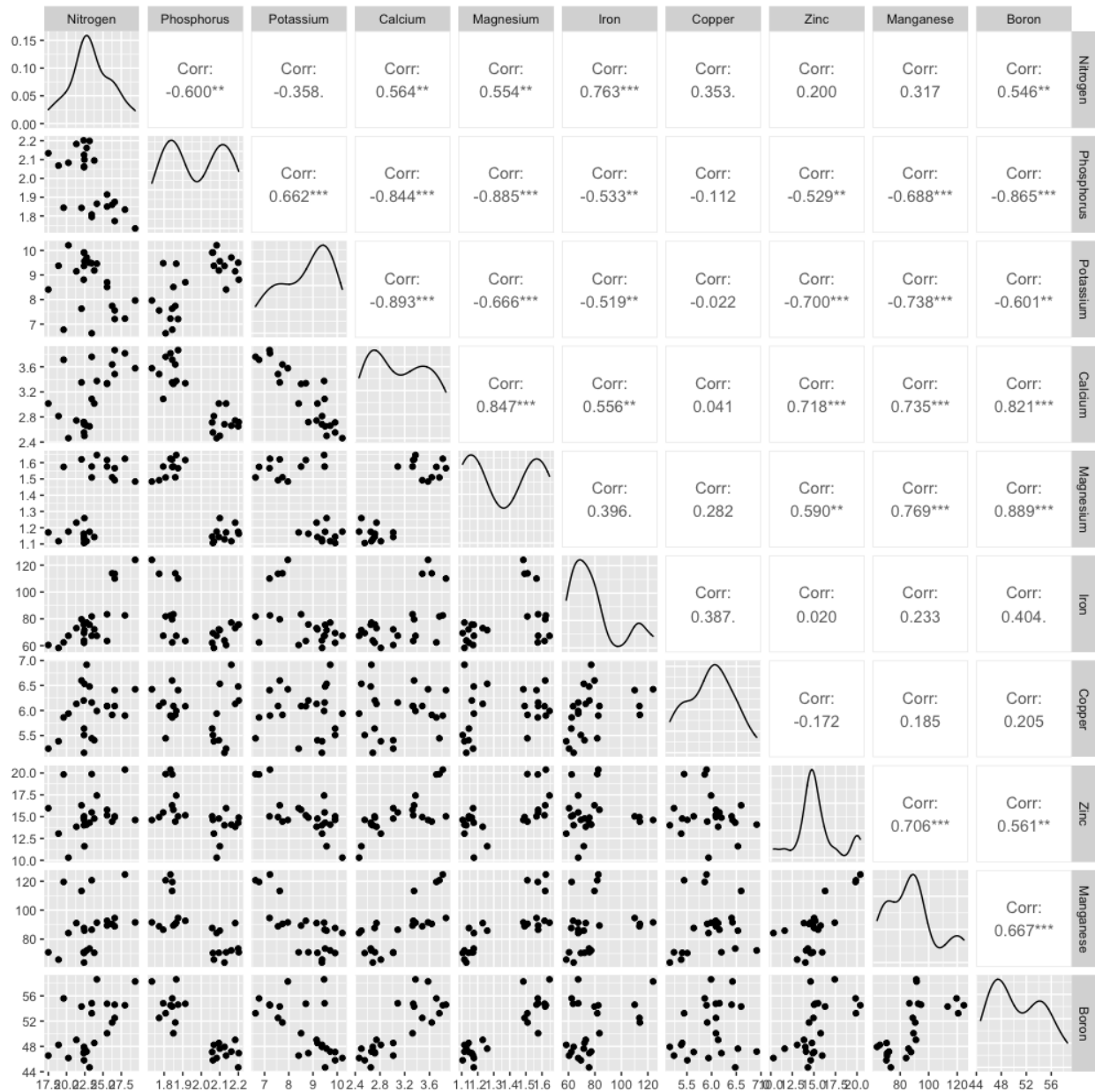


**Figura 2. 7.** Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207. \*\*\* = Significativo a  $P \leq 0.001$ ; \*\* = Significativo a  $P \leq 0.01$ ; \* = Significativo a  $P \leq 0.05$ .

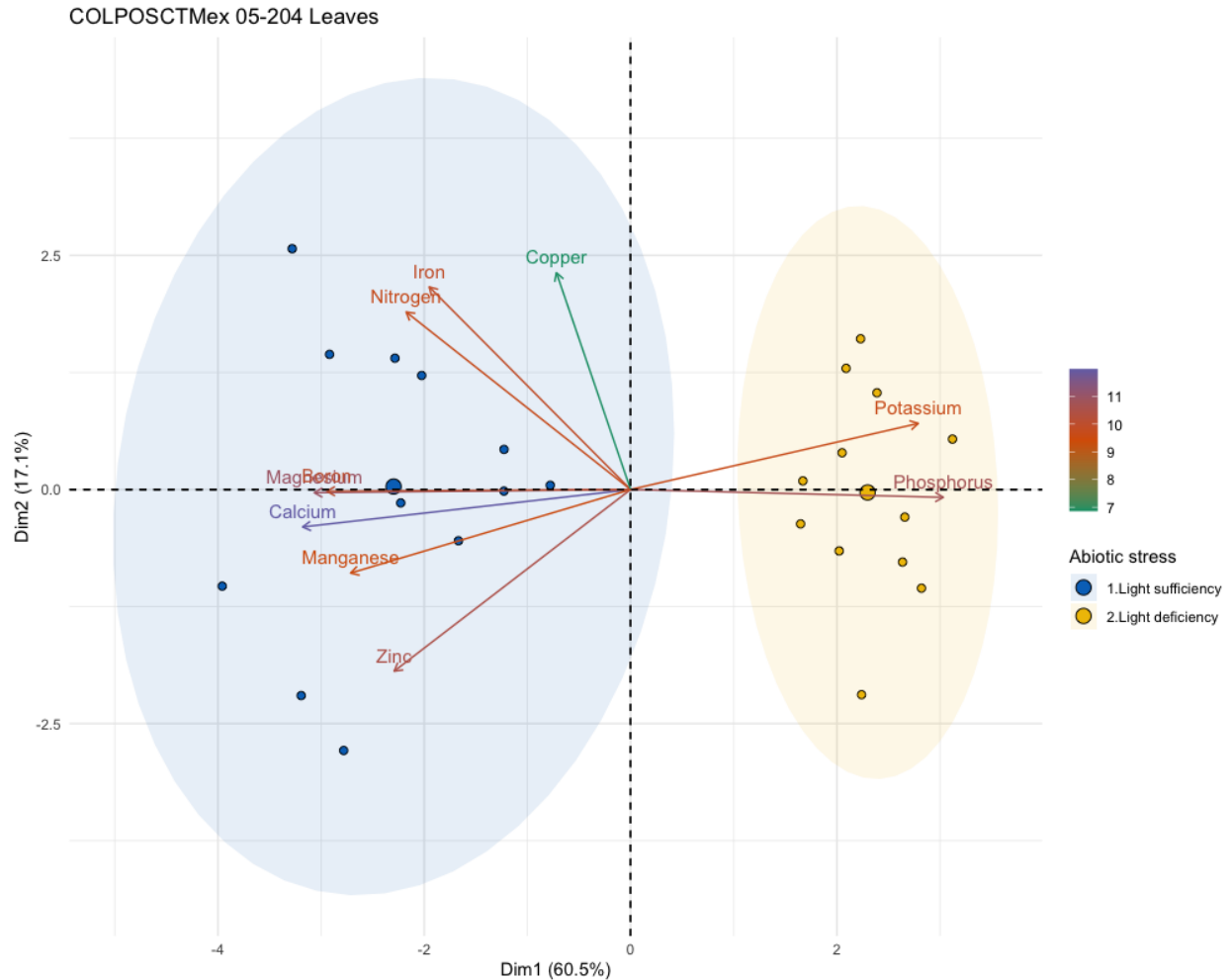


**Figura 2. 8.** Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207.





**Figura 2. 9.** Correlación determinaciones nutrimentales en respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) en hojas de caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204. \*\*\* = Significativo a  $P \leq 0.001$ ; \*\* = Significativo a  $P \leq 0.01$ ; \* = Significativo a  $P \leq 0.05$ .



**Figura 2. 10.** Análisis de componentes principales, respuesta al estrés abiótico (deficiencia de luz) sobre determinaciones nutrimentales en hojas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204.

### 2.6.6. Concentración foliar de pigmentos fotosintéticos

En situación de estrés por sombra, se observó un incremento general en la concentración foliar de pigmentos fotosintéticos en los tres cultivares de caña de azúcar; con excepción de la relación entre clorofila *a* y clorofila *b*, que presenta una reducción significativa en los cultivares MotzMex 92-207 y COLPOSCTMex 05-204 (**Cuadros 2.10, 2.11 y 2.12**).

Se observó que el aporte de Phi equivalente al 10% del P total como bioestimulante, incrementó significativamente la relación entre la concentración foliar de clorofila total (*a+b*) y carotenos en casi 4% en el cv. CP 72-2086 (**Cuadro 2.10**).

En el **Cuadro 2.10**, se aprecia que en el cv. CP 72-2086, en condiciones de luz, la adición de Phi equivalente al 10% del P total como bioestimulante, incrementó significativamente la relación entre la concentración de clorofila total ( $a+b$ ) y carotenos en 11.8%, y redujo la relación entre la clorofila  $a$  y clorofila  $b$  en 15.7%; mientras que el Phi en concentraciones equivalentes al 20% del P total, redujo la concentración foliar de carotenos en 26.2%.

En el cv. MotzMex 92-207 la deficiencia de luz incrementó las concentraciones de clorofilas y carotenos, así como la relación clorofila total/carotenos (**Cuadro 2.11**). Asimismo, se observó que el aporte de Phi en concentraciones equivalentes al 10% del P total, redujo significativamente la concentración foliar de clorofila  $b$ , clorofila total ( $a+b$ ) y carotenos en 17.9, 14.162 y 15.6% (**Cuadro 2.11**).

Por otra parte, se aprecia que en el cv. MotzMex 92-207, en condiciones de luz, la adición de 10% del P total como Phi, redujo significativamente la concentración foliar de clorofila  $a$ , clorofila  $b$ , clorofila total ( $a+b$ ) y carotenos en 31.9, 40.2, 33.9 y 28.3% (**Cuadro 2.11**).

**Cuadro 2. 10.** Concentración foliar ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>Clorofila a</b>	<b>Clorofila b</b>	<b>Clorofila total</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	70.50±13.5b	22.58±4.7b	93.07±17.5b
Deficiencia	110.77±8.4a	34.46±3.9a	145.24±12.1a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	96.26±19.4a	29.58±6.1a	125.84±25.3a
10	88.08±20.0a	28.98±4.1a	117.06±23.9a
20	87.56±31.0a	27.00±11.0a	114.56±41.9a
Pr(>F)	0.1876	0.2844	0.2218
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	79.73±9.5b	24.54±2.1cd	104.27±11.4b
Suficiencia + 10	71.06±10.6b	25.91±2.1bc	96.97±12.5b
Suficiencia + 20	60.69±15.1b	17.29±3.7d	77.98±18.7b
Deficiencia + 0	112.80±7.4a	34.62±3.8a	147.42±11.0a
Deficiencia + 10	105.10±6.8a	32.05±3.1ab	137.15±9.7a
Deficiencia + 20	114.42±9.5a	36.72±4.2a	151.14±13.3a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Factor</b>	<b>Carotenos</b>	<b>Clorofila a / Clorofila b</b>	<b>Clorofila total / Carotenos</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	19.19±3.5b	3.16±0.4a	4.85±0.3b
Deficiencia	22.61±1.6a	3.23±0.2a	6.42±0.2a
Pr(>F)	0.0013	0.3900	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	22.55±1.6a	3.26±0.2ab	5.57±1.0b
10	20.09±2.5a	3.01±0.4b	5.79±0.6a
20	20.06±4.5a	3.31±0.3a	5.54±0.9b
Pr(>F)	0.0563	0.0151	0.0181
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	22.39±2.1ab	3.24±0.2a	4.65±0.1c
Suficiencia + 10	18.68±2.6bc	2.73±0.2b	5.20±0.1b
Suficiencia + 20	16.52±3.3c	3.50±0.2a	4.69±0.2c
Deficiencia + 0	22.71±1.3ab	3.27±0.2a	6.49±0.2a
Deficiencia + 10	21.51±1.6ab	3.29±0.2a	6.38±0.1a
Deficiencia + 20	23.61±1.6a	3.13±0.2ab	6.40±0.2a
Pr(>F)	0.0016	0.0010	<0.0001

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 2. 11.** Concentración foliar ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

Factor	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	54.32±13.5b	15.99±5.1b	70.30±18.4b
Deficiencia	105.59±9.0a	32.84±3.6a	138.44±12.5a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	83.33±21.1ab	26.20±6.5a	109.53±27.6a
10	72.52±30.6b	21.50±9.8b	94.02±40.3b
20	84.01±34.6a	25.54±12.3ab	109.55±46.8a
Pr(>F)	0.0314	0.0201	0.0252
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	65.70±13.8b	20.87±3.9b	86.57±17.6b
Suficiencia + 10	44.74±8.8c	12.49±1.8c	57.22±10.3c
Suficiencia + 20	52.51±10.3bc	14.60±5.0bc	67.11±15.2bc
Deficiencia + 0	100.96±4.9a	31.53±2.9a	132.49±7.7a
Deficiencia + 10	100.30±6.6a	30.52±1.6a	130.82±8.0a
Deficiencia + 20	115.52±5.8a	36.48±3.0a	152.00±8.7a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	0.0001
Factor	Carotenos	Clorofila a / Clorofila b	Clorofila total / Carotenos
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	17.57±3.6b	3.49±0.5a	3.97±0.3b
Deficiencia	22.76±2.0a	3.22±0.1b	6.09±0.2a
Pr(>F)	<0.0001	0.0471	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	21.23±2.5a	3.18±0.1a	5.12±1.0a
10	17.92±4.1b	3.43±0.3a	5.05±1.2a
20	21.34±4.2a	3.46±0.5a	4.92±1.3a
Pr(>F)	0.0093	0.1539	0.2899
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	20.36±3.5ab	3.14±0.1a	4.24±0.2b
Suficiencia + 10	14.60±2.8c	3.58±0.4a	3.93±0.2b
Suficiencia + 20	17.74±2.4bc	3.73±0.6a	3.75±0.4b
Deficiencia + 0	22.10±0.9ab	3.21±0.2a	6.00±0.3a
Deficiencia + 10	21.23±1.5ab	3.29±0.1a	6.17±0.2a
Deficiencia + 20	24.94±1.1a	3.17±0.1a	6.09±0.2a
Pr(>F)	<0.0001	0.0595	<0.0001

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 2. 12.** Concentración foliar ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de pigmentos fotosintéticos en plantas de caña de azúcar cv. COLPOSCTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

Factor	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	63.79±13.2b	16.64±4.1b	80.43±16.8b
Deficiencia	101.02±12.4a	32.93±4.5a	133.95±16.4a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	78.10±21.9a	23.67±9.8a	101.77±31.5a
10	81.58±31.3a	24.84±10.9a	106.42±42.1a
20	87.54±13.9a	25.84±8.2a	113.38±21.9a
Pr(>F)	0.2576	0.6405	0.3360
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	59.68±12.9c	15.35±5.4b	75.04±18.1c
Suficiencia + 10	54.99±9.9c	15.70±4.5b	70.69±14.1c
Suficiencia + 20	76.70±5.2bc	18.86±1.2b	95.55±5.9bc
Deficiencia + 0	96.51±6.9ab	31.99±3.6a	128.50±9.1ab
Deficiencia + 10	108.18±17.3a	33.98±5.8a	142.15±23.1a
Deficiencia + 20	98.39±10.4ab	32.81±5.0a	131.20±15.4a
Pr(>F)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Factor	Carotenos	Clorofila a / Clorofila b	Clorofila total / Carotenos
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>			
Suficiencia	17.45±2.8b	3.92±0.6a	4.58±0.3b
Deficiencia	20.62±2.0a	3.08±0.2b	6.49±0.3a
Pr(>F)	0.0008	0.0002	<0.0001
<b>Phi, % del P total</b>			
0	18.11±2.3a	3.54±0.7a	5.53±1.3a
10	18.81±4.2a	3.41±0.6a	5.47±1.0a
20	20.20±1.3a	3.54±0.6a	5.60±0.9a
Pr(>F)	0.1144	0.8091	0.7377
<b>IL + Phi</b>			
Suficiencia + 0	17.05±2.8bc	4.04±0.7ab	4.36±0.4b
Suficiencia + 10	15.33±2.0c	3.64±0.8abc	4.58±0.4b
Suficiencia + 20	19.99±1.3bc	4.07±0.3a	4.78±0.1b
Deficiencia + 0	19.99±1.0abc	3.04±0.3bc	6.70±0.2a
Deficiencia + 10	22.30±2.3a	3.19±0.1abc	6.35±0.5a
Deficiencia + 20	20.41±1.5ab	3.02±0.2c	6.41±0.3a
Pr(>F)	0.0011	0.0065	<0.0001

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### 2.6.7. Concentración foliar de aminoácidos

Se posee evidencia significativa para concluir que el aporte de Phi equivalente al 10 y 20% del P total a la solución nutritiva como bioestimulante, reduce significativamente la concentración de aminoácidos libres totales en los cultivares MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204 (**Cuadros 2.14 y 2.15**). Mientras que, en el cv. CP 72-2086, el Phi en concentración de 10% del P total reduce también la concentración foliar de aminoácidos (**Cuadro 2.13**).

Respecto a la adición de Phi como bioestimulante en condiciones de no deficiencia de luz, se posee evidencia de reducciones significativas de 36.2 y 44.6% en la concentración foliar de aminoácidos en los cv. MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204 (**Cuadros 2.14 y 2.15**).

En situación de estrés por falta de luminosidad se observó una reducción significativa del 26.6% en la concentración foliar de aminoácidos libres totales en el cv. COLPOS CTMex 05-204 (**Cuadro 2.15**).

**Cuadro 2. 13.** Concentración foliar ( $\eta$ M) de aminoácidos libres totales en plantas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

Factor	Aminoácidos libres totales
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>	
Suficiencia	576.81±140.7a
Deficiencia	536.59±203.1a
Pr(>F)	0.5598
<b>Phi, % del P total</b>	
0	671.72±208.1a
10	436.79±193.1b
20	561.59±152.1ab
Pr(>F)	0.0360
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>	
Suficiencia + 0	684.05±150.9a
Suficiencia + 10	500.49±36.3a
Suficiencia + 20	545.89±148.5a
Deficiencia + 0	659.38±117.4a
Deficiencia + 10	373.10±277.6a
Deficiencia + 20	577.29±167.4a
Pr(>F)	0.1505

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 2. 14.** Concentración foliar ( $\eta$ M) de aminoácidos libres totales en plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>Aminoácidos libres totales</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>	
Suficiencia	626.39±114.7a
Deficiencia	628.82±77.7a
Pr(>F)	0.9458
<b>Phi, % del P total</b>	
0	788.43±145.5a
10	606.94±234.9b
20	487.45±133.2c
Pr(>F)	<0.0001
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>	
Suficiencia + 0	705.89±96.4ab
Suficiencia + 10	722.62±93.3a
Suficiencia + 20	450.66±90.7c
Deficiencia + 0	870.96±97.0a
Deficiencia + 10	491.26±47.3c
Deficiencia + 20	524.24±83.2bc
Pr(>F)	<0.0001

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 2. 15.** Concentración foliar ( $\eta$ M) de aminoácidos libres totales en plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05-204 bajo dos intensidades luminosas tratadas con fosfito.

<b>Factor</b>	<b>Aminoácidos libres totales</b>
<b>Intensidad luminosa (IL)</b>	
Suficiencia	569.31±139.4a
Deficiencia	417.93±150.6b
Pr(>F)	0.0142
<b>Phi, % del P total</b>	
0	574.93±205.9a
10	514.29±123.2ab
20	391.64±175.7c
Pr(>F)	0.0438
<b>Tratamiento, IL + Phi</b>	
Suficiencia + 0	697.65±53.7a
Suficiencia + 10	623.87±104.1ab
Suficiencia + 20	386.40±123.4b
Deficiencia + 0	452.21±197.0ab
Deficiencia + 10	404.71±147.2ab
Deficiencia + 20	396.88±149.9ab
Pr(>F)	0.0155

Medias  $\pm$  DE con letras distintas de cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).



### 2.6.8. Curvas de crecimiento de hojas

Los modelos de crecimiento empleados en la generación de curvas de crecimiento de hojas de caña de azúcar de los tres cultivares evaluados se presentan en el **Cuadro 2.16**.

**Cuadro 2. 16.** Modelos de cinética de crecimiento de hoja de plantas de caña de azúcar de tres cultivares bajo dos condiciones de luminosidad tratadas con fosfito.

Cultivar	Tratamiento IL + Phi	Modelo	R <sup>2</sup>
CP 72-2086	Suficiencia + 0	$y = 0.5859x - 3.6196$	0.9595
	Suficiencia + 10	$y = 0.5903x - 1.8362$	0.9527
	Suficiencia + 20	$y = 0.5546x + 1.6235$	0.9746
	Deficiencia + 0	$y = 0.5793x - 0.7912$	0.9706
	Deficiencia + 10	$y = 0.5605x + 1.6867$	0.9575
	Deficiencia + 20	$y = 0.5993x - 1.0617$	0.9555
MotzMex 92-207	Suficiencia + 0	$y = 0.5924x - 1.5401$	0.9820
	Suficiencia + 10	$y = 0.5677x - 0.655$	0.9635
	Suficiencia + 20	$y = 0.5857x + 1.4672$	0.9701
	Deficiencia + 0	$y = 0.5606x + 1.2396$	0.9508
	Deficiencia + 10	$y = 0.5648x + 0.1769$	0.9332
	Deficiencia + 20	$y = 0.5662x + 0.627$	0.9211
COLPOS CTMex 05-204	Suficiencia + 0	$y = 0.5218x - 0.8213$	0.9697
	Suficiencia + 10	$y = 0.4742x - 0.3711$	0.9572
	Suficiencia + 20	$y = 0.5285x - 2.9434$	0.9516
	Deficiencia + 0	$y = 0.6019x - 5.4202$	0.9454
	Deficiencia + 10	$y = 0.5707x + 0.7469$	0.9412
	Deficiencia + 20	$y = 0.5926x - 1.6785$	0.9665

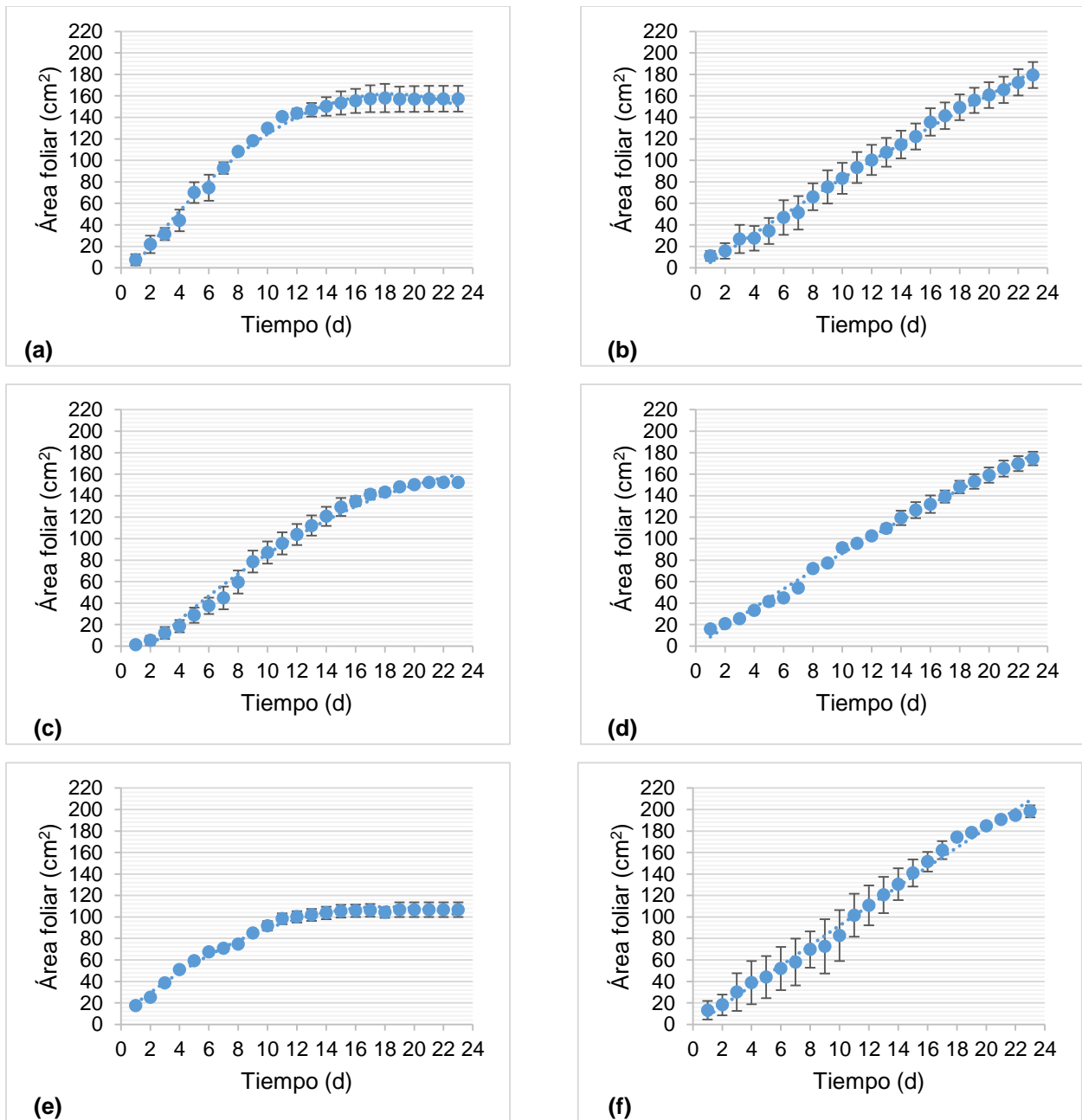
Las curvas de crecimiento de hoja de caña de azúcar de tres cultivares evaluados (**Figuras 2.11, 2.12 y 2.13**) permiten apreciar el efecto del Phi como bioestimulante en suficiencia y deficiencia de luz durante 23 d de tratamiento, información que se complementa con el análisis de la variable respuesta área foliar (cm<sup>2</sup>) obtenida al final de los 23 d de tratamiento (**Cuadros 2.4, 2.5 y 2.6**).

En la **Figura 2.11**, se aprecia que, en situación de suficiencia de luz, la adición de Phi como bioestimulante a una concentración de 10% del P total, prolongo la etapa de crecimiento de la hoja hasta el día 21, de igual modo, se aprecia que Phi a una

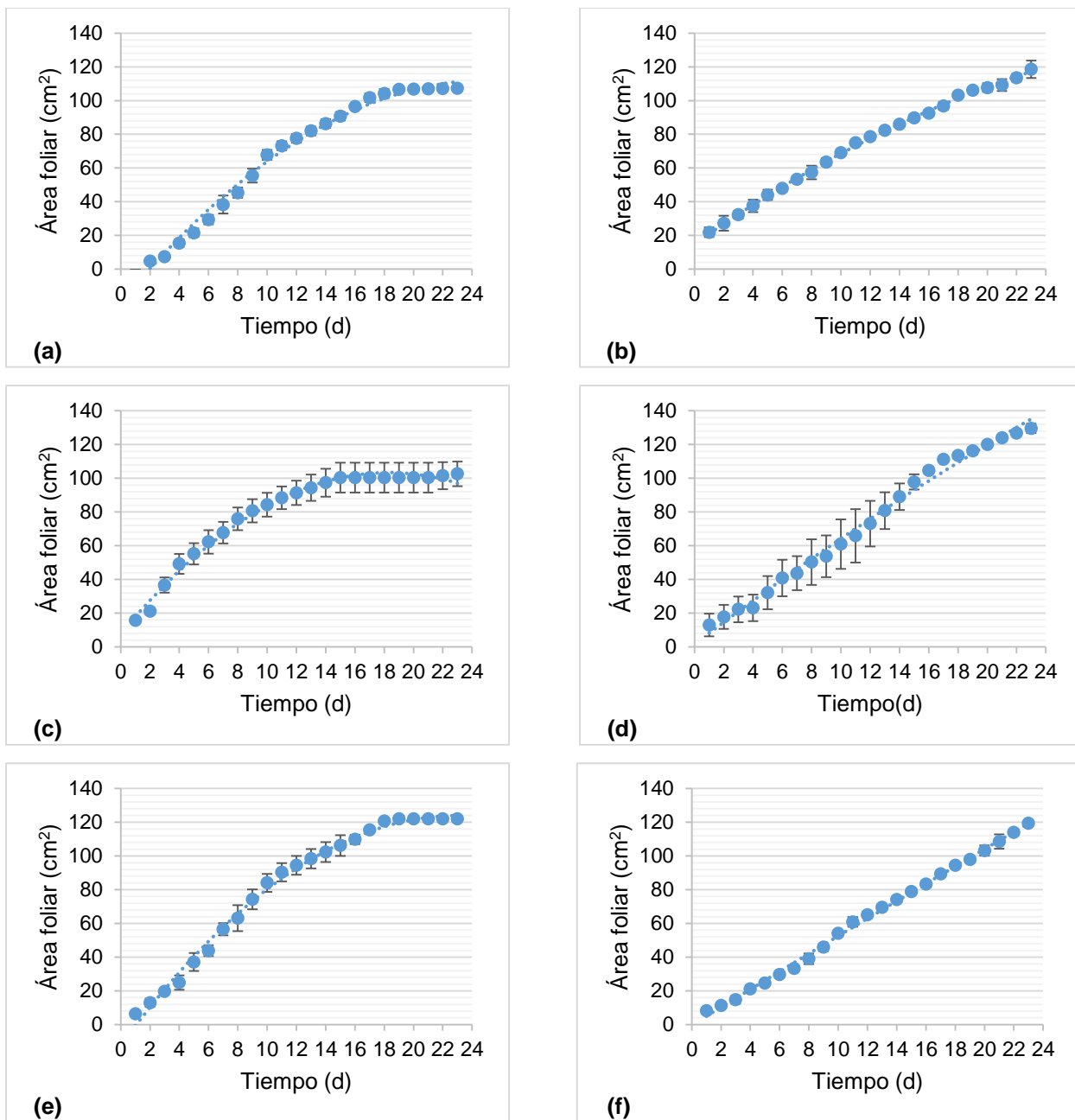
concentración de 20% limito el desarrollo potencial de la hoja y favoreció efectos senescentes a partir del día 14. Por otro lado, en situación de deficiencia de luz, no se observan efectos claros respecto a la adición de Phi como bioestimulante debido al efecto de etiolación de las hojas en plantas de caña de azúcar.

En la **Figura 2.12**, se aprecia que, en situación de suficiencia de luz, la adición de Phi como bioestimulante a una concentración de 10% del P total, limito la etapa de crecimiento de la hoja hasta el día 15 además de reducir el área foliar en 10% respecto al tratamiento testigo, por el contrario, aplicaciones de Phi a concentración de 20% incremento el desarrollo de la hoja hasta el día 20 teniendo un 9% más de área foliar respecto al tratamiento sin aplicación de Phi. En situación de deficiencia de luz, no se observan efectos claros respecto a la adición de Phi como bioestimulante debido al efecto de etiolación de las hojas en plantas de caña de azúcar.

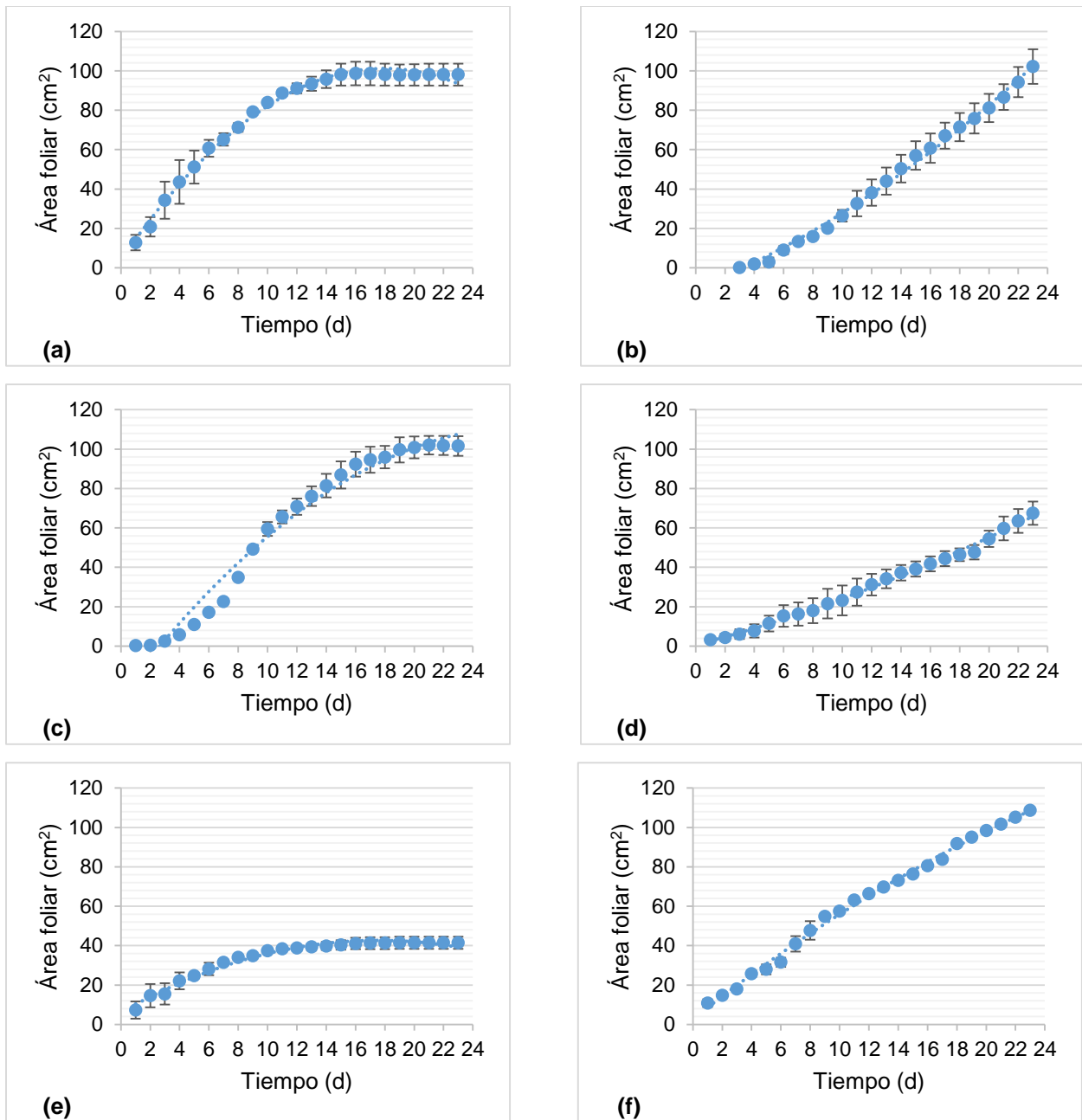
En la **Figura 2.13**, se aprecia que, en situación de suficiencia de luz, la adición de Phi como bioestimulante a una concentración de 10% del P total, prolongo la etapa de crecimiento de la hoja hasta el día 21, de igual modo, se aprecia que Phi a una concentración de 20% limito el desarrollo potencial de la hoja y favoreció efectos senescentes a partir del día 15. Por otro lado, en situación de deficiencia de luz, no se observan efectos claros respecto a la adición de Phi como bioestimulante debido al efecto de etiolación de las hojas en plantas de caña de azúcar.



**Figura 2. 11.** Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. CP 72 2086 tratadas con fosfito y sometidas a dos intensidades luminosas. **a)** Suficiencia de luz + 0% Phi, **b)** Deficiencia de luz + 0% Phi, **c)** Suficiencia de luz + 10%Phi, **d)** Deficiencia de luz + 10%Phi, **e)** Suficiencia de luz + 20%Phi y **f)** Deficiencia de luz + 20%Phi.



**Figura 2. 12.** Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. MotzMex 92-207 tratadas con fosfito y sometidas a dos intensidades luminosas. **a)** Suficiencia de luz + 0% Phi, **b)** Deficiencia de luz + 0% Phi, **c)** Suficiencia de luz + 10%Phi, **d)** Deficiencia de luz + 10%Phi, **e)** Suficiencia de luz + 20%Phi y **f)** Deficiencia de luz + 20% Phi.



**Figura 2. 13.** Curvas de crecimiento de hojas de plantas de caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05 204 tratadas con fosfito y sometidas a dos intensidades luminosas. **a)** Suficiencia de luz + 0% Phi, **b)** Deficiencia de luz + 0% Phi, **c)** Suficiencia de luz + 10%Phi, **d)** Deficiencia de luz + 10%Phi, **e)** Suficiencia de luz + 20%Phi y **f)** Deficiencia de luz + 20% Phi.

### 2.6.9. Parámetros fotosintéticos

La deficiencia de luz redujo el área foliar a menos de 6 cm<sup>2</sup> lo que limitó la toma de datos en condiciones de estrés por intensidad luminosa. Se aprecia que en condiciones de suficiencia de luz, la aplicación de Phi como bioestimulante a concentraciones de 10% del P total redujo en 18.6, 0.9 y 28.5% la tasa fotosintética, en 19.9, 25.9 y 41 % la conductancia estomática del agua en los cultivares CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOSCTMex 05-204; mientras que, a concentraciones de Phi de 20% del P total redujeron en un 18.1, 18.2 y 23.2% la tasa fotosintética, en 77.1, 45.2 y 65 % la conductancia estomática del agua, en 17.5, 3.5 y 16.6% la concentración intracelular de CO<sub>2</sub> en los tres cultivares de caña (**Figura 2.17, 2.18 y 2.19**).

**Cuadro 2. 17.** Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. CP 72 2086 tratadas con fosfito y sometida a dos intensidades luminosas.

Tratamiento, IL + Phi	$P_N$	$g_s$	E	$T_{hoja}$	$C_i$	EUA	EUA <sub>i</sub>
Suficiencia + 0	34.80	2.31	7.62	25.48	316.26	4.57	15.06
Suficiencia + 10	28.32	1.85	7.62	26.03	327.45	3.72	15.31
Suficiencia + 20	28.49	0.53	6.30	28.28	261.06	4.52	53.75
Deficiencia + 0	6.37	0.12	2.45	29.30	295.65	2.60	53.08
Deficiencia + 10	No data	0.03	0.89	29.49	598.13	No data	No data
Deficiencia + 20	No data	0.03	0.91	30.05	823.24	No data	No data

$P_N$ : tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $g_s$ : Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), E: Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), T: temperatura interna hoja ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_i$ : Concentración intracelular de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), EUA: eficiencia en el uso del agua instantánea ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), EUA<sub>i</sub>: eficiencia en el uso del agua intrínseca ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

**Cuadro 2. 18.** Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. MotzMex 92 207 tratadas con fosfito y sometida a dos intensidades luminosas.

Tratamiento, IL + Phi	$P_N$	$g_s$	E	$T_{hoja}$	$C_i$	EUA	EUA <sub>i</sub>
Suficiencia + 0	33.21	1.35	7.18	26.05	301.87	4.63	24.60
Suficiencia + 10	32.91	1.00	7.37	27.06	289.63	4.47	32.91
Suficiencia + 20	27.15	0.74	7.49	28.36	291.33	3.62	36.69
Deficiencia + 0	No data	No data	No data	29.91	No data	No data	No data
Deficiencia + 10	No data	No data	No data	29.74	No data	No data	No data
Deficiencia + 20	No data	No data	No data	30.23	No data	No data	No data

$P_N$ : tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $g_s$ : Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), E: Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), T: temperatura interna hoja ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_i$ : Concentración intracelular de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), EUA: eficiencia en el uso del agua instantánea ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), EUA<sub>i</sub>: eficiencia en el uso del agua intrínseca ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

**Cuadro 2. 19.** Parámetros fotosintéticos en hojas de plantas caña de azúcar cv. COLPOS CTMex 05 204 tratadas con fosfito y sometida a dos intensidades luminosas.

Tratamiento, IL + Phi	$P_N$	$g_s$	E	$T_{hoja}$	$C_i$	EUA	EUA <sub>i</sub>
Suficiencia + 0	35.17	1.17	7.38	26.63	291.41	4.77	30.06
Suficiencia + 10	25.15	0.69	6.22	27.04	295.86	4.04	36.45
Suficiencia + 20	27.01	0.41	5.72	28.79	242.93	4.72	65.88
Deficiencia + 0	No data	No data	No data	29.30	No data	No data	No data
Deficiencia + 10	No data	No data	No data	30.00	No data	No data	No data
Deficiencia + 20	No data	No data	No data	30.55	No data	No data	No data

$P_N$ : tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $g_s$ : Conductancia estomática al agua ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), E: Tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), T: temperatura interna hoja ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_i$ : Concentración intracelular de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), EUA: eficiencia en el uso del agua instantánea ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), EUA<sub>i</sub>: eficiencia en el uso del agua intrínseca ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

## 2.7 DISCUSIÓN

### 2.7.1. Estrés abiótico

Como se mencionó ampliamente en la revisión de literatura y en el capítulo I del presente trabajo de investigación, el estrés abiótico limita el crecimiento y la productividad de los cultivos agrícolas (Ferreira *et al.*, 2017), este tipo de estrés desencadena respuestas individuales y comunes, las cuales pueden ser sinérgicas o antagónicas (Hasanuzzaman *et al.*, 2021).

Las plantas son organismos sésiles incapaces de escapar a su entorno, por tanto, han desarrollado mecanismos de control celular y químico para hacer frente a la variabilidad de la luz solar que incide sobre ellas y al estrés por sombra, la escala de tiempo de estos cambios puede cambiar desde subsegundos hasta horas. Las nubes en movimiento reducen la luz a diferentes niveles y en distintos momentos, las sombras producen grandes cambios en la luz durante minutos y las hojas en movimiento producen luces parpadeantes en una escala de tiempo de subsegundos a segundos (Liao *et al.*, 2017).

La luz solar provee la energía para la fotosíntesis de las plantas, por lo que, en condiciones de poca luz, se produce una cantidad insuficiente de ATP para la fijación de carbono y la biosíntesis de carbohidratos, lo que conduce a la reducción del crecimiento de las plantas (Mathur *et al.*, 2018), esta información concuerda con lo reportado en esta investigación, donde el efecto de estrés por insuficiencia de luz causó una reducción significativa en el diámetro de tallo, área foliar, biomasa fresca y seca de raíz, tallo y hoja (**Cuadros 2.4, 2.5 y 2.6**) en los tres cultivares de caña de azúcar, así como una reducción en la  $P_N$ ,  $g_s$ ,  $E$ ,  $C_i$  y EUA del cv. CP 72 2086 (**Cuadro 2.17**).

De igual modo, proporciones bajas del rojo e infrarrojo en el espectro de luz son distintivos de sombra y de altas densidades de siembra, esto causa un síndrome de evitación de la sombra (SAS, por sus siglas en inglés shade avoidance syndrome) que se caracteriza por hojas en hiponastía, caracterizada por el aumento de la elongación del hipocótilo, entrenudos y pecíolos extendidos, para ganar la mayor cantidad de luz



posible (Roeber *et al.*, 2021), información que coincide con los resultados obtenidos en este trabajo, donde la altura de tallo y el área foliar de los tres cultivares de caña de azúcar sometidos a estrés por sombra fue mayor (**Cuadros 2.4, 2.5 y 2.6**).

Las plantas poseen dos sistemas diferentes para percibir la información luminosa del ambiente, los fotorreceptores y los cloroplastos, estos últimos, pueden percibir la información luminosa a través de las clorofilas presentes en los complejos de captación de luz en las membranas del tilacoides, en función a la disponibilidad de luz, las plantas modifican la estructura de la grana y cambian las proporciones relativas de clorofila *a* y *b* para optimizar y proteger el aparato fotosintético (Roeber *et al.*, 2021). Yu *et al.*, (2019), señalan que a pesar de que el contenido de clorofilas se encuentra relacionado con la eficiencia del aparato fotosintético, esta correlación puede no reflejar directamente la capacidad fotosintética de la planta.

Muhidin *et al.* (2018) reportan incrementos significativos en los niveles de clorofila y antocianinas en diferentes cultivares de arroz bajo distintos niveles de sombra (<25, 25-50, 50-75 y >75%). De igual modo, Mathur *et al.* (2018) mencionan que las hojas en sombra maximizan la captura de luz pero reducen los costos de mantener el exceso de maquinaria fotosintética, estas hojas muestran evidencia de altas concentraciones de clorofila por unidad de masa foliar, baja actividad de ATPasa y contenido de Rubisco, información que concuerda con la obtenida en este trabajo, donde la concentración de pigmentos fotosintéticos clorofila *a*, *b* y carotenos en hoja de los tres cultivares de caña de azúcar (**Cuadros 2.10, 2.11 y 2.12**), se incrementó significativamente al someterse al estrés por sombra.

Es lógico suponer que todas las variables estudiadas son producto de los procesos dependientes de la luz y la oscuridad. Productos inmediatos de la fase dependiente de la luz son NADPH, ATP, O<sub>2</sub> y protones; éstos últimos se bombean a través de la membrana del tilacoide del cloroplasto para crear un fuerte gradiente de pH entre el estroma y el espacio tilacoidal (lumen). La fijación de CO<sub>2</sub> ocurre en el espacio del estroma y depende estrictamente del pH y ATP. El producto inmediato de la fijación de CO<sub>2</sub> es el glicerato-3-fosfato, que requiere ATP y NADPH para la conversión final en

hexosas, incluida la glucosa, por lo que la velocidad de la glucosa está limitada por las reacciones de la luz (Liao *et al.*, 2017).

### **2.7.2. Bioestimulante**

Los bioestimulantes vegetales son sustancias que aplicadas a las plantas promueven procesos naturales para mejorar o beneficiar la absorción y eficiencia de los nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad de los cultivos. Su aplicación se considera una práctica agrícola novedosa y respetuosa con el ambiente, la cual combina dos conceptos que de otro modo contrastarían, la intensificación de cultivos y la sostenibilidad.

Las sales de Phi siguen posicionándose como un bioestimulante vegetal, ya que confiere tolerancia ante ciertos factores de estrés abiótico, aumentan la absorción y asimilación de nutrientes, mejora el crecimiento de la planta, así como la calidad y el rendimiento de algunos cultivos agrícolas (Mohammadi *et al.*, 2021), información que coincide con la obtenida en esta investigación, donde la aplicación de Phi como bioestimulante incrementó de manera significativa el área foliar y el peso fresco de raíz en el cv. MotzMex 92-207 (**Cuadro 2.5**), al igual que, la concentración de nutrimentos como el K y Mn en hojas de caña de azúcar de los cultivares CP 72 2086 y MotzMex 92-207 al aplicar una dosis de 10% de Phi (**Cuadros 2.7 y 2.8**); y la concentración de Zn en hojas de caña cv. CP 72 2086 y COLPOS CTMex 05-204 al aplicar la dosis de 20% de Phi (**Cuadros 2.7 y 2.9**).

### **2.7.3. Interacción entre bioestimulación y estrés abiótico**

Las plantas durante su crecimiento y desarrollo, están expuestas a condiciones ambientales adversas que amenazan el crecimiento, el rendimiento y su supervivencia, condiciones que desencadenan respuestas vegetales complejas que están reguladas por moléculas de señalización, factores de transcripción, genes y sistemas de defensa que ayudan a hacer frente a los efectos adversos del estrés (Hasanuzzaman *et al.*, 2021).

La elongación acelerada de entrenudos y el aumento de la longitud de los tallos, es la característica típica del SAS; la caña de azúcar es una de las plantas más eficientes en

la utilización y conversión de la energía solar en azúcar y otras formas renovables de energía y se cultiva principalmente por su capacidad para almacenar concentraciones altas de sacarosa fácilmente extraíble de los entrenudos del tallo, siendo un cultivo que normalmente se siembra en condiciones de temperatura y densidades relativamente altas (Ferreira *et al.*, 2017; Showler, 2016).

Pierik & Testerink (2014) mencionan algunas respuestas inducidas por estrés por sombra, en función a las altas densidades de siembra o en presencia de luz roja lejana, como es el alargamiento del tallo en maíz y papa, un macollaje reducido en trigo, respuestas que reducen la producción de biomasa y por consecuencia afectan la producción agrícola, características que coinciden con las obtenidas en los distintos cultivares de caña de azúcar bajo estrés por sombra (**Cuadros 2.4, 2.5 y 2.6**).

Las clorofilas presentes en la membrana del tilacoide son compuestos de tetrapirrol que contienen magnesio y son esenciales para la captación de luz y transducción de energía. La intensidad de luz ambiental modula el contenido de ciertos componentes de los tilacoides, como son las proporciones PSII/PSI, el número de centros de reacción, capacidad de evolución de oxígeno y transporte de electrones (Hussain *et al.*, 2019).

Los bioestimulantes de plantas, son capaces de inducir una serie de respuestas bioquímicas, fisiológicas y moleculares positivas en condiciones de estrés abiótico; sin embargo, es importante mencionar que esta acción de estimulación no siempre es consistente en términos de eficacia, por lo que, no puede generalizarse para todo tipo de cultivos (Basile *et al.*, 2020). La presente investigación coincide con lo anterior, dado que la aplicación de Phi como bioestimulante a la dosis del 20% del P total vía radical, incrementó significativamente el área foliar, la biomasa seca, el peso fresco de hoja y raíz, así como el peso seco de hoja del cv. MotzMex 92-207 (**Cuadro 2.5**).

Hussain *et al.* (2019) indicaron que las aplicaciones foliares de Ti como bioestimulante incrementan de manera significativa los parámetros morfológicos de la raíz del cultivo de frijol en condiciones de luz normal y de estrés por sombra, esta información coincide con la obtenida en nuestro trabajo, donde en situación de luz normal y sin estrés por sombra, la aplicación vía radical de Phi como bioestimulante incrementó de manera significativa

el peso fresco de raíz cv. MotzMex 92-207 (**Cuadro 2.5**), lo cual, será útil para aumentar la absorción de agua y nutrimentos.

Además, Hussain *et al.* (2019) concluyen en su trabajo que el incremento en la acumulación de biomasa en las plantas de frijol tratadas con Ti como bioestimulante se debe principalmente al aumento en la acumulación de los pigmentos de clorofila *a*, *b*, *a+b*, lo que es contrario a lo obtenido en nuestra investigación, donde los pigmentos de clorofila *a*, *b*, *a+b* de los tres cultivares de caña de azúcar se incrementaron significativamente en situación de estrés por sombra (**Cuadros 2.10, 2.11 y 2.12**), sin observar efectos positivos respecto a la adición de Phi como bioestimulante. Por su parte, Oyarburo *et al.* (2015) resaltan que las aplicaciones foliares de KPhi en hojas de papa en condiciones de luz y sin estrés, incrementan de manera significativa la concentración de clorofilas, información contraria a la obtenida en este trabajo, donde los cultivares CP 72-2086 y MotzMex 92-207 muestran ligeras reducciones en la concentración de pigmentos fotosintéticos al incrementar la dosis de Phi como bioestimulante (**Cuadros 2.10 y 2.11**).

Ávila *et al.* (2011), mencionan que la sustitución de 25% de Pi por Phi en la solución nutritiva indujo una mejora en la actividad de guaiacol (POD) y la biosíntesis de lignina en plantas de maíz, información, que coincide con la obtenida en la presente investigación, donde hubo un incremento en la altura de planta y en la biomasa seca aérea al adicionar 20% Phi como bioestimulante en condiciones óptimas de luz en los cv. CP 72 2086 y MotzMex 92-207 (**Cuadros 2.4 y 2.5**). Formisano *et al.* (2021) mencionan que aplicaciones vía riego de KPhi en ausencia de estrés abiótico, desencadenó una respuesta de defensa de las plantas de calabacín a través de ROS al promover la acumulación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en las raíces, correlacionado con la acción de fitohormonas como ácido salicílico, ácido jasmonico, auxinas y etileno.

El término hormesis es ampliamente conocido en el campo de la toxicología, se ha utilizado para describir la relación dosis-respuesta bifásica con estimulación beneficiosa a dosis bajas y efectos tóxico a dosis altas. La hormesis se define como “una respuesta adaptativa de dosis bifásica donde responde a un factor determinante del estrés, en el que subdosis inducen estimulación y dosis altas inducen inhibición”, la inducción de

hormesis en biología vegetal conduce a respuestas que pueden influir en el mecanismo celular y molecular de las plantas, incluida la fotosíntesis, la reacción de Hill, el contenido de clorofila, las vías de señalización y las enzimas antioxidantes que se reflejan en el rendimiento de los cultivos (Jalal *et al.*, 2021). Hussain *et al.* (2019) mencionan un efecto hormético en hojas de plantas de frijol, aumentó el área foliar, la actividad de Rubisco y la concentración de clorofila *a*, *b* y *a+b*, debido a la aspersion foliar de Ti a una concentración baja de 1.25 mg planta<sup>-1</sup> información que concuerda con la obtenida para el cv. MotzMex 92-207 (**Cuadros 2.11**).

Es importante recordar que los elementos esenciales son aquellos que requiere un organismo para completar su ciclo de vida. Hay 17 elementos esenciales para todas las plantas, y se pueden dividir en macronutrientes y micronutrientes. Los primeros incluyen C, H, O, Ca, K, Mg, N, S y P, de los cuales C, H y O representan aproximadamente el 95 % de la materia seca de la planta, mientras que los otros suelen estar presentes en concentraciones >1000 mg kg<sup>-1</sup> de peso seco. Los microelementos, también llamados oligoelementos, comprenden Cl, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn, que suelen estar presentes en concentraciones <100 mg kg<sup>-1</sup> de peso seco (Alcántar-González *et al.*, 2009; Fageria *et al.*, 2002). Los elementos químicos, como Al, Co, Na, Se y Si, promueven el crecimiento de las plantas, pero no son requeridos por todas las especies de plantas, se denominan elementos benéficos, los cuales se pueden encontrar en suelos y plantas en diferentes formas insolubles o sales inorgánicas, compuestos iónicos formados por aniones cargados negativamente y cationes cargados positivamente incluidos fosfitos, fosfonatos, bicarbonatos, silicatos, sulfatos y nitratos (Afonso *et al.*, 2022). Aunque su modo de acción aún no se comprende por completo, estos compuestos pueden promover el crecimiento de las plantas, la calidad de los productos vegetales y la tolerancia al estrés abiótico a través de varios mecanismos, que incluyen la rigidez de la pared celular, osmorregulación, reducción de la transpiración, reflexión de la radiación que conduce a la regulación térmica, actividad enzimática, nutrición vegetal, protección antioxidante, interacciones con simbiosis, respuestas a patógenos y herbívoros, protección o síntesis de toxicidad de metales pesados y señalización de hormonas vegetales (Afonso *et al.*, 2022). Estos compuestos, sales inorgánicas, se han utilizado contra enfermedades fúngicas, ya que tienen algunas

ventajas importantes, incluido su bajo costo, impacto reducido en el medio ambiente y baja toxicidad en mamíferos (Afonso *et al.*, 2022). Esta actividad fungicida parece derivarse de su capacidad para cambiar el equilibrio osmótico, de pH y redox, así como de influir en la actividad de las hormonas y enzimas involucradas en las respuestas al estrés (Afonso *et al.*, 2022), información que coincide con la obtenida en la presente investigación al tener un incremento significativo en la concentración de Mg y Mn en hoja de los cultivares MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204 (**Cuadros 2.8 y 2.9**), o solo Mn en el cv. CP 72 2086 (**Cuadros 2.7**), o reducciones significativas en la concentración de N en los cv. CP 72 2086 y MotzMex 92-207 (**Cuadros 2.7 y 2.8**).

Ávila *et al.* (2011), mencionan que, el reemplazo de 25% de Pi por Phi disminuyó la producción de biomasa seca, la acumulación de P en raíz y hoja de plantas de maíz cultivadas con un suministro bajo de Pi, pero no se observó ningún efecto en las plantas cultivadas con un suministro adecuado de Pi. Por su parte, Gómez-Merino & Trejo-Téllez (2016) mencionan que el uso de Phi como bioestimulante se potencializa cuando los niveles nutricionales de Pi están en dosis adecuadas, información que coincide con la obtenida en la presente investigación donde la biomasa seca aérea del cv. MotzMex 92-207 se incrementó significativamente al adicionar Phi como bioestimulante a niveles de Pi adecuados (**Cuadro 2.5**).

## 2.8 CONCLUSIONES

La inducción de estrés por sombra afectó de manera negativa las variables descriptivas y nutrimentales, de los tres cv. CP 72-2086, MotzMex 92-207 y COLPOS CTMex 05-204 e incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos del cv. CP 72-2086 de plantas de caña de azúcar.

El aporte de Phi (0.037 y 0.070 mol<sub>c</sub> m<sup>-3</sup>) vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 35% afectó de manera positiva algunas variables descriptivas, nutrimentales y la concentración pigmentos fotosintéticos en hojas de caña de azúcar del cv. MotzMex 92-207.

El cv. MotzMex 92-207 de maduración no temprana, fue la planta de caña de azúcar que mejor respuesta obtuvo a la adición de Phi como bioestimulante vía radicular en la solución nutritiva de Steiner al 35%.

## CONCLUSIONES GENERALES

En las últimas décadas, el uso de bioestimulantes agrícolas se incrementó de forma considerable, por lo que, es común observar el uso de sales inorgánicas de Phi en la agricultura contemporánea. Phi ha demostrado estimular mecanismos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos, que impactan en la eficiencia nutrimental, el rendimiento y la calidad de algunos cultivos en los sistemas de producción agrícola no biotecnológicos, es decir, en plantas que no son modificadas genéticamente (Gómez-Merino & Trejo-Téllez, 2015), ya que, inducen resistencia ante ciertas limitantes ambientales como son la radiación UV y el calor (Machinandiarena *et al.*, 2018; Xi *et al.*, 2020).

Gracias a la eficiencia en las tecnologías de producción actuales, como son el uso de sistemas hidropónicos y aspersiones foliares, los efectos positivos de Phi sobre el metabolismo primario y el crecimiento de las plantas se aprecian cada vez más, especialmente cuando se aplica a dosis bajas y en condiciones de suficiencia de Pi; En la presente investigación la adición de fosfito (Phi,  $H_2PO_3^-$ ) como bioestimulante vía radical afectó de manera positiva parámetros de crecimiento, de absorción nutrimental, fotosíntesis y clorofilas en los tres cultivares de plantas de caña de azúcar bajo situación de estrés abiótico.

Se cree que el cv. MotzMex 92-207, tuvo un mejor sinergismo entre las moléculas de Phi y Pi, al ampliar la actividad de ciertas enzimas secuestradoras de ROS y algunos genes hipersensibles a la sal, debido a que fue el cultivar que mejor respuesta obtuvo a las dosis propuestas como bioestimulante en presencia y en ausencia de estrés abiótico.

Aunque se ha logrado un avance importante en temas de absorción, de transporte y localización subcelular de Phi, falta estudiar más a detalle los efectos benéficos de éste bioestimulante en el metabolismo de las plantas cuando se manipula de manera adecuada.



## LITERATURA CITADA

- Afonso, S., Oliveira, I., Meyer, A. S., & Berta Gonçalves. (2022). Biostimulants to Improved Tree Physiology and Fruit Quality A Review with Special Focus on Sweet Cherry. *Agronomy*, 12(3), 659.
- Aguilar-Rivera, N., Algara-Siller, M., Olvera-Vargas, L. A., & Michel-Cuello, C. (2018). Land management in Mexican sugarcane crop fields. *Land Use Policy*, 78, 763–780. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.034>
- Aguilar-Rivera, N., Rodríguez L., D. A., Enríquez R., V., Castillo M., A., & Herrera S., A. (2012). The Mexican Sugarcane Industry: Overview, Constraints, Current Status and Long-Term Trends. *Sugar Tech*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0151-3>
- Alcántar-González, G., & Sandoval-Villa, M. (1999). *Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación*. In: Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.
- Alcántar-González, G., Trejo-Téllez, L. I., Fernández Pavía, L., & Rodríguez Mendoza, M. de las N. (2009). Elementos esenciales. En G. Alcántar-González & L. I. Trejo-Téllez (Eds.), *Nutrición de Cultivos* (COLPOS, pp. 8–47).
- Ali, S. E., El Gedaily, R. A., Mocan, A., Farag, M. A., & El-Seedi, H. R. (2019). Profiling metabolites and biological activities of sugarcane (*Saccharum officinarum* linn.) juice and its product molasses via a multiplex metabolomics approach. *Molecules*, 24(5), 934. <https://doi.org/10.3390/molecules24050934>
- Artschwager, E., & Brandes, E. (1958). Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.): origin, classification, characteristics, and descriptions of representative clones. En *Agricultural Research Service*. Crops Research Division.
- Ávila, F. W., Faquin, V., Lopes Araújo, J., Marques, D. J., Ribeiro Júnior, P. M., da Silva Lobato, A. K., Ramos, S. J., & Pereira Baliza, D. (2011). Phosphite supply affects phosphorus nutrition and biochemical response in maize plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 646–653.
- Azevedo, R. A., Carvalho, R. F., Cia, M. C., & Gratão, P. L. (2011). Sugarcane Under Pressure: An Overview of Biochemical and Physiological Studies of Abiotic Stress. *Tropical Plant Biology*, 4(1), 42–51. <https://doi.org/10.1007/s12042-011-9067-4>
- Bakker, H. (1999). The Origins of Sugar Cane. En *Sugar Cane Cultivation and Management* (1a ed., pp. 1–2). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4725-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4725-9_1)
- Bañas-Llanos, M. B. (2015). Plantones a bordo...!!! (intercambio de especies vegetales entre la península Ibérica, América y Asia, en el siglo XVI). *Revista Hispanoamericana*, 5, 1–12.

- Basile, B., Roupshael, Y., Colla, G., Soppelsa, S., & Andreotti, C. (2020). Appraisal of emerging crop management opportunities in fruit trees, grapevines and berry crops facilitated by the application of biostimulants. *Scientia Horticulturae*, 267(November 2019), 109330. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109330>
- Bassi, D., Menossi, M., & Mattiello, L. (2018). Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20653-1>
- Begcy, K., Mariano, E. D., Gentile, A., Lembke, C. G., Zingaretti, S. M., Souza, G. M., & Menossi, M. (2012). A novel stress-induced sugarcane gene confers tolerance to drought, salt and oxidative stress in transgenic tobacco plants. *PLoS ONE*, 7(9), e44697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044697>
- Bisson, C., Adams, N. B. P., Stevenson, B., Brindley, A. A., Polyviou, D., Bibby, T. S., Baker, P. J., Hunter, C. N., & Hitchcock, A. (2017). The molecular basis of phosphite and hypophosphite recognition by ABC-transporters. *Nature Communications*, 8(1746). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01226-8>
- Bremner, J. M. (1965). Total Nitrogen. In: Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. En C. A. Black, D. D. Evans, L. E. Ensminger, J. . White, F. E. Clark, & R. D. Dinauer (Eds.), *Soil Science* (Vol. 100, Número 5). In: Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.1097/00010694-196511000-00020>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Function of Nutrients: Micronutrients. En *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 191–248). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), 1–30. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Capaldi, F. R., Gratão, P. L., Reis, A. R., Lima, L. W., & Azevedo, R. A. (2015). Sulfur metabolism and stress defense responses in plants. En *Tropical Plant Biology* (Vol. 8, Números 3–4). <https://doi.org/10.1007/s12042-015-9152-1>
- Casasola-Elizondo, C. A., Trejo-Téllez, L. I., Alcántar-González, G., Gómez-Merino, F. C., & García-Morales, S. (2017). Cadmio y fosfito en crecimiento de plántulas de tomate. En F. Pérez-Soto, E. Figueroa-Hernández, L. Godínez-Montoya, & J. Rocha-Quiroz (Eds.), *Caracterización físico-química de la producción agropecuaria y sus derivados* (ECORFAN, pp. 28–37). ECORFAN-México, S.C. [https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias de la Quimica y Agronomia T-I/HCQA\\_TI.pdf](https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias de la Quimica y Agronomia T-I/HCQA_TI.pdf)
- Castañeda-Castro, O., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Morales-Ramos, V.,

- González-Arno, M. T., Martínez-Ocampo, Y. M., Gámez-Pastrana, R., & Pastelín-Solano, M. C. (2014). Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales en caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *AGROProductividad*, 7(2), 16–21.
- Castañeda-Castro, O., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., & Pastelín-Solano, M. C. (2015). Osmotic stress induced by polyethylene-glycol alters macronutrient concentrations in sugarcane (*Saccharum* spp.) Plants in vitro. *Agrociencia*, 49(8), 859–873.
- Castañeda-Castro, O., Pastelín-Solano, M. C., Trejo-Téllez, L. I., Solano-Pastelín, E. A., & Gómez-Merino, F. C. (2021). Differential effect of salinity on growth, nutrient concentration and chlorophyll in sugarcane varieties mex 69-290 and cp 72-2086. *Agrociencia*, 55(7), 597–610. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i7.2606>
- Castro, B., Citterico, M., Kimura, S., Stevens, D. M., Wrzaczek, M., & Coaker, G. (2021). Stress-induced reactive oxygen species compartmentalization, perception and signalling. *Nature Plants*, 7(4), 403–412. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00887-0>
- Cervantes-Preciado, J. F., Milanés-Ramos, N., & Castillo, M. A. (2019). Evaluación de 11 híbridos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en la región central de Veracruz, México. *AgroProductividad*, 12(3), 69–73. <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1085>
- Chaves, M., & Davies, B. (2010). Drought effects and water use efficiency: Improving crop production in dry environments. En *Functional Plant Biology*. [https://doi.org/10.1071/FPv37n2\\_FO](https://doi.org/10.1071/FPv37n2_FO)
- Chiconato, D. A., da Silveira Sousa Junior, G., dos Santos, D. M. M., & Munns, R. (2019). Adaptation of sugarcane plants to saline soil. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.021>
- Claassens, N. J., Sánchez-Andrea, I., Sousa, D. Z., & Bar-Even, A. (2018). Towards sustainable feedstocks: A guide to electron donors for microbial carbon fixation. *Current Opinion in Biotechnology*, 50, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.01.019>
- CONADESUCA-SIIBA. 2016. Regiones Cañeras. (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar - Sistema de Información para la Integración del Balance Azucarero). Regiones Cañeras. Disponible online: [https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/GEO\\_PORTAL\\_CONADESUCA/RegionesCañeras.html](https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/GEO_PORTAL_CONADESUCA/RegionesCañeras.html)
- da Silveira, G., Costa, P. M. d. A., Kist, V., de Almeida, C. F., Baffa, D. C. F., & Barbosa, M. H. P. (2014). Genetic variation affecting agronomic traits in sugarcane in response to high and low phosphorus availability. *Agronomy Journal*, 106(6), 2296–2304. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0199>
- Deseo, M. A., Elkins, A., Rochfort, S., & Kitchen, B. (2020). Antioxidant activity and polyphenol composition of sugarcane molasses extract. *Food Chemistry*,

314(126180), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126180>

- dos Reis, C. O., Magalhães, P. C., Avila, R. G., Almeida, L. G., Rabelo, V. M., Carvalho, D. T., Cabral, D. F., Karam, D., & de Souza, T. C. (2019). Action of N-Succinyl and N,O-Dicarboxymethyl Chitosan Derivatives on Chlorophyll Photosynthesis and Fluorescence in Drought-Sensitive Maize. *Journal of Plant Growth Regulation*, *38*(2), 619–630. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9877-9>
- Dou, H., & Niu, G. (2020). Plant responses to light. En T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *In Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* (Second Edi, pp. 153–166). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816691-8.00009-1>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, *196*, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Elsheery, N. I., Sunoj, V. S. J., Wen, Y., Zhu, J. J., Muralidharan, G., & Cao, K. F. (2020). Foliar application of nanoparticles mitigates the chilling effect on photosynthesis and photoprotection in sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, *149*, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.035>
- Estrada-Ortiz, E., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., Silva-Rojas, H. V., Castillo-González, A. M., & Avitia-García, E. (2016). Physiological responses of chard and lettuce to phosphite supply in nutrient solution. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *18*(4), 1079–1090.
- Fageria, N. K., Baligar, C., & Clark, R. B. (2002). Micronutrients in crop production. En *Advances in Agronomy* (Vol. 77). [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(02\)77015-6](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(02)77015-6)
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, *8*(1147), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- Fan, J., Zhang, W., Amombo, E., Hu, L., Kjørven, J. O., & Chen, L. (2020). Mechanisms of environmental stress tolerance in turfgrass. *Agronomy*, *10*(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040522>
- FAOSTAT. 2020. FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, División de Estadística). Disponible online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (acceso 7 diciembre 2020)
- Feng, S., Luo, Z., Zhang, Y., Zhong, Z., & Lu, B. (2014). Phytochemical contents and antioxidant capacities of different parts of two sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivars. *Food Chemistry*, *151*, 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.057>

- Fernández-Delgado, M. A. (2019). La Ciencia Recreativa, “Historia de un pan de azúcar” (1871), de José Joaquín Arriaga. *Alambique: Revista académica de ciencia ficción y fantasía / Jornal acadêmico de ficção científica e fantasia*, 6(2), 1–24. <https://doi.org/10.5038/2167-6577.6.2.1>
- Ferreira, T. H. S., Tsunada, M. S., Bassi, D., Araújo, P., Mattiello, L., Guidelli, G. V., Righetto, G. L., Gonçalves, V. R., Lakshmanan, P., & Menossi, M. (2017). Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1077. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>
- Figueroa, I. A., & Coates, J. D. (2017). Microbial Phosphite Oxidation and Its Potential Role in the Global Phosphorus and Carbon Cycles. En *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 98, pp. 93–117). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2016.09.004>
- Figueroa Rodríguez, K. A., García García, A. M. T., Mayett Moreno, Y., Hernández Rosas, F., & Figueroa Sandoval, B. (2015). Factores que explican el rendimiento de caña de azúcar a nivel municipal en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1345–1358. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.581>
- Fleming, T. R., Fleming, C. C., Levy, C. C. B., Repiso, C., Hennequart, F., Nolasco, J. B., & Liu, F. (2019). Biostimulants enhance growth and drought tolerance in *Arabidopsis thaliana* and exhibit chemical priming action. *Annals of Applied Biology*, 174(2), 153–165. <https://doi.org/10.1111/aab.12482>
- Forieri, I., Wirtz, M., & Hell, R. (2013). Toward new perspectives on the interaction of iron and sulfur metabolism in plants. *Frontiers in Plant Science*, 4(357), 1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00357>
- Formisano, L., Miras-Moreno, B., Ciriello, M., El-Nakhel, C., Corrado, G., Lucini, L., Colla, G., & Roupheal, Y. (2021). *Trichoderma* and phosphite elicited distinctive secondary metabolite signatures in zucchini squash plants. *Agronomy*, 11(6), 1205. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061205>
- Garcia, A., Crusciol, C. A. C., McCray, J. M., Nascimento, C. A. C., Martello, J. M., de Siqueira, G. F., & Tarumoto, M. B. (2020). Magnesium as a Promoter of Technological Quality in Sugarcane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(1), 19–30. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00096-x>
- Geiger, M., Walch-Liu, P., Engels, C., Harnecker, J., Schulze, E. D., Ludewig, F., Sonnewald, U., Scheible, W. R., & Stitt, M. (1998). Enhanced carbon dioxide leads to a modified diurnal rhythm of nitrate reductase activity in older plants, and a large stimulation of nitrate reductase activity and higher levels of amino acids in young tobacco plants. *Plant, Cell and Environment*, 21, 253–268. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00277.x>
- Gerszberg, A., & Hnatuszko-Konka, K. (2017). Tomato tolerance to abiotic stress: a review of most often engineered target sequences. *Plant Growth Regulation*, 83(2),

- 175–198. <https://doi.org/10.1007/s10725-017-0251-x>
- Giehl, R. F. H., & von Wirén, N. (2014). Root nutrient foraging. *Plant Physiology*, *166*(2), 509–517. <https://doi.org/10.1104/pp.114.245225>
- Glasauer, A., & Chandel, N. S. (2013). ROS. *Current Biology*, *23*(3), R100–R102. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.011>
- Gómez-Merino, F. C., & Senties-Herrera, H. E. (2015). *Manual para la identificación varietal de caña de azúcar* (F. C. Gómez-Merino & H. E. Senties-Herrera (eds.); COLPOS). Colegio de Postgraduados.
- Gómez-Merino, F. C., & Trejo-Téllez, L. I. (2015). Biostimulant activity of phosphite in horticulture. *Scientia Horticulturae*, *196*, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.035>
- Gómez-Merino, F. C., & Trejo-Téllez, L. I. (2016). Conventional and novel uses of phosphite in horticulture: potentialities and challenges. *Italus Hortus*, *23*(2), 1–13. <https://www.researchgate.net/publication/322926789>
- Gong, Z., Xiong, L., Shi, H., Yang, S., Herrera-Estrella, L. R., Xu, G., Chao, D. Y., Li, J., Wang, P. Y., Qin, F., Li, J., Ding, Y., Shi, Y., Wang, Y., Yang, Y., Guo, Y., & Zhu, J. K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. *Science China Life Sciences*, *63*(5), 635–674. <https://doi.org/10.1007/s11427-020-1683-x>
- Goñi, O., Quille, P., & O’Connell, S. (2018). *Ascophyllum nodosum* extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *126*, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.024>
- Grivet, L., Daniels, C., Glaszmann, J. C., & D’Hont, A. (2004). A Review of Recent Molecular Genetics Evidence for Sugarcane Evolution and Domestication. *Ethnobotany Research and Applications*, *2*, 009–017. <https://doi.org/10.17348/era.2.0.9-17>
- Hameed, A., Dilfuza, E., Abd-Allah, E. F., Hashem, A., Kumar, A., & Ahmad, P. (2014). Salinity Stress and Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Plants. En Mohammad Miransari (Ed.), *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stress, Volume 1* (pp. 139–159). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_7)
- Han, X., Xi, Y., Zhang, Z., Mohammadi, M. A., Joshi, J., Borza, T., & Wang-Pruski, G. (2021). Effects of phosphite as a plant biostimulant on metabolism and stress response for better plant performance in *Solanum tuberosum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *210*, 111873. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111873>
- Hasanuzzaman, M., Parvin, K., Bardhan, K., Nahar, K., Anee, T. I., Masud, A. A. C., & Fotopoulos, V. (2021). Biostimulants for the regulation of reactive oxygen species metabolism in plants under abiotic stress. *Cells*, *10*(10), 1–29. <https://doi.org/10.3390/cells10102537>

- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. En *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 135–189). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Herrera-Estrella, L., & López-Arredondo, D. (2016). Phosphorus: The Underrated Element for Feeding the World. *Trends in Plant Science*, 21(6), 461–463. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.04.010>
- Hussain, S., Iqbal, N., Brestic, M., Raza, M. A., Pang, T., Langham, D. R., Safdar, M. E., Ahmed, S., Wen, B., Gao, Y., Liu, W., & Yang, W. (2019). Changes in morphology, chlorophyll fluorescence performance and Rubisco activity of soybean in response to foliar application of ionic titanium under normal light and shade environment. *Science of the Total Environment*, 658, 626–637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.182>
- Irvine, J. E. (1999). Saccharum species as horticultural classes. *Theoretical and Applied Genetics*, 98, 186–194. <https://doi.org/10.1007/s001220051057>
- Jalal, A., Oliveira Junior, J. C. de, Ribeiro, J. S., Fernandes, G. C., Mariano, G. G., Trindade, V. D. R., & Reis, A. R. dos. (2021). Hormesis in plants: Physiological and biochemical responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111225>
- Johnson, M. P. (2016). Photosynthesis. *Essays in Biochemistry*, 60(3), 255–273. <https://doi.org/10.1042/EBC20160016>
- Kapoor, D., Singh, S., Kumar, V., Romero, R., Prasad, R., & Singh, J. (2019). Antioxidant enzymes regulation in plants in reference to reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS). *Plant Gene*, 19, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2019.100182>
- Karapouloutidou, S., & Gasparatos, D. (2019). Effects of biostimulant and organic amendment on soil properties and nutrient status of *Lactuca sativa* in a calcareous saline-sodic soil. *Agriculture*, 9(164), 1–14. <https://doi.org/10.3390/agriculture9080164>
- Karimi, S., Yadollahi, A., Arzani, K., Imani, A., & Aghaalikhani, M. (2015). Gas-exchange response of almond genotypes to water stress. *Photosynthetica*, 53(1), 29–34. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0070-0>
- Karthikeyan, K., & Shanmugam, M. (2017). The effect of potassium-rich biostimulant from seaweed *Kappaphycus alvarezii* on yield and quality of cane and cane juice of sugarcane var. Co 86032 under plantation and ratoon crops. *Journal of Applied Phycology*, 29(6), 3245–3252. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1211-6>
- Khalil, F., Naiyan, X., Tayyab, M., & Pinghua, C. (2018). Screening of ems-induced drought-tolerant sugarcane mutants employing physiological, molecular and enzymatic approaches. *Agronomy*, 8(10), 226.

<https://doi.org/10.3390/agronomy8100226>

- Kingston, G. (2013). Mineral Nutrition of Sugarcane. En *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology* (pp. 85–120). <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch5>
- Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., & Bekkaoui, F. (2018). Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Frontiers in Chemistry*, *6*(26), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00026>
- Le Gall, H., Philippe, F., Domon, J. M., Gillet, F., Pelloux, J., & Rayon, C. (2015). Cell wall metabolism in response to abiotic stress. *Plants*, *4*(1), 112–166. <https://doi.org/10.3390/plants4010112>
- Leitão, A. L., & Enguita, F. J. (2016). Gibberellins in *Penicillium* strains: Challenges for endophyte-plant host interactions under salinity stress. *Microbiological Research*, *183*, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.004>
- Leiva-Ampuero, A., Agurto, M., Matus, J. T., Hoppe, G., Huidobro, C., Inostroza-Blacheteau, C., Reyes-Díaz, M., Stange, C., Canessa, P., & Vega, A. (2020). Salinity impairs photosynthetic capacity and enhances carotenoid-related gene expression and biosynthesis in tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom). *PeerJ*, *8*, e9742. <https://doi.org/10.7717/peerj.9742>
- Li, C., Nong, Q., Solanki, M. K., Liang, Q., Xie, J., Liu, X., Li, Y., Wang, W., Yang, L., & Li, Y. (2016). Differential expression profiles and pathways of genes in sugarcane leaf at elongation stage in response to drought stress. *Scientific Reports*, *6*(25698), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep25698>
- Liao, K. L., Jones, R. D., McCarter, P., Tunc-Ozdemir, M., Draper, J. A., Elston, T. C., Kramer, D., & Jones, A. M. (2017). A shadow detector for photosynthesis efficiency. *Journal of Theoretical Biology*, *414*(November 2016), 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2016.11.027>
- Lloyd-Evans, D., Hlongwane, T. T., Joshi, S. V., & Riaño Pachón, D. M. (2019a). The sugarcane mitochondrial genome: assembly, phylogenetics and transcriptomics. *PeerJ*, *7*(e7558), 1–53. <https://doi.org/10.7717/peerj.7558>
- Lloyd-Evans, D., & Joshi, S. V. (2016). Complete chloroplast genomes of *Saccharum spontaneum*, *Saccharum officinarum* and *Miscanthus floridulus* (Panicoideae: Andropogoneae) reveal the plastid view on sugarcane origins. *Systematics and Biodiversity*. <https://doi.org/10.1080/14772000.2016.1197336>
- Lloyd-Evans, D., & Joshi, S. V. (2017). A new origin of sugarcane: the undiscovered species. En *In: Proceedings of the Annual Congress-S Afr Sug Technol Ass* (Vol. 90). South African Sugar Technologists' Association.
- Lloyd-Evans, D., & Joshi, S. V. (2020). Origins, History and Molecular Characterization of Creole Cane. *BioRxiv*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2020.07.29.226852>



- Lloyd-Evans, D., Joshi, S. V., & Wang, J. (2019b). Whole chloroplast genome and gene locus phylogenies reveal the taxonomic placement and relationship of *Tripidium* (Panicoideae: Andropogoneae) to sugarcane. *BMC Evolutionary Biology*, *19*(33), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s12862-019-1356-9>
- López-Arredondo, D. L., & Herrera-Estrella, L. (2013). A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under in vitro and greenhouse conditions based on phosphite metabolism. *Plant Biotechnology Journal*, *11*(4), 516–525. <https://doi.org/10.1111/pbi.12063>
- Loubser, J., & Hills, P. (2020). The application of a commercially available citrus-based extract mitigates moderate nacl-stress in *Arabidopsis thaliana* plants. *Plants*, *9*(8), 1–23. <https://doi.org/10.3390/plants9081010>
- Lovatt, C., & Mikkelsen, R. (2006). Phosphite fertilizers: What are they?. Can you use them? What can they do? *Better Crops With Plant Food*, *90*(4), 11–13.
- Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. En *Current Opinion in Plant Biology* (Vol. 12, Número 3). <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Machinandiarena, M. F., Oyarburo, N. S., Daleo, G. R., Andreu, A. B., & Olivieri, F. P. (2018). The reinforcement of potato cell wall as part of the phosphite-induced tolerance to UV-B radiation. *Biología Plantarum*, *62*(2), 388–394. <https://doi.org/10.1007/s10535-018-0780-9>
- Martinez-Estrada, E. (2017). *Variación somaclonal durante la micropropagación de caña de azúcar (Saccharum spp.) en biorreactores de inmersión temporal* [Colegio Postgraduados Campus Córdoba]. <http://hdl.handle.net/10521/3679>
- Mathur, S., Jain, L., & Jajoo, A. (2018). Photosynthetic efficiency in sun and shade plants. *Photosynthetica*, *56*(1), 354–365. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0767-y>
- Merwad, A. R. M. A. (2020). Mitigation of salinity stress effects on growth, yield and nutrient uptake of wheat by application of organic extracts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *51*(9), 1–11. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1751188>
- Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The Osmotic Potential of Polyethylene Glycol 6000. *Plant Physiology*, *51*(5), 914–916. <https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914>
- Mirajkar, S. J., Dalvi, S. G., Ramteke, S. D., & Suprasanna, P. (2019). Foliar application of gamma radiation processed chitosan triggered distinctive biological responses in sugarcane under water deficit stress conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, *139*, 1212–1223. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.093>
- Miranda-Marini, R., Cruz-Huerta, N., González-Hernández, V. A., & Palma-Tenango, M. (2018). Plant growth kinetics of sugar cane plants propagated conventionally and in vitro. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *21*(2), 253–260.

- Mohammadi, M. A., Cheng, Y., Aslam, M., Jakada, B. H., Wai, M. H., Ye, K., He, X., Luo, T., Ye, L., Dong, C., Hu, B., Priyadarshani, S. V. G. N., Wang-Pruski, G., & Qin, Y. (2021). ROS and Oxidative Response Systems in Plants Under Biotic and Abiotic Stresses: Revisiting the Crucial Role of Phosphite Triggered Plants Defense Response. *Frontiers in Microbiology*, 12(July), 1–21. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631318>
- Moles, T. M., Pompeiano, A., Huaranca Reyes, T., Scartazza, A., & Guglielminetti, L. (2016). The efficient physiological strategy of a tomato landrace in response to short-term salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.10.008>
- Moores, S., & Stein, W. H. (1954). A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino acids and related compounds. *The Journal of biological chemistry*, 211, 893–906.
- Muhidin, Syam'Un, E., Kaimuddin, Musa, Y., Sadimantara, G. R., Usman, Leomo, S., & Rakian, T. C. (2018). The effect of shade on chlorophyll and anthocyanin content of upland red rice. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 122(1), 012030. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/122/1/012030/pdf>
- Murad, A. M., Molinari, H. B. C., Magalhães, B. S., Franco, A. C., Takahashi, F. S. C., De Oliveira, N. G., Franco, O. L., & Quirino, B. F. (2014). Physiological and proteomic analyses of *Saccharum* spp. grown under salt stress. *PLoS ONE*, 9(6), e98463. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098463>
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5(86), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>
- Oyarburo, N. S., Machinandiarena, M. F., Feldman, M. L., Daleo, G. R., Andreu, A. B., & Olivieri, F. P. (2015). Potassium phosphite increases tolerance to UV-B in potato. *Plant Physiology and Biochemistry*, 88, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.01.003>
- Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(6), 4056–4075. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1>
- Pasek, M. (2019). A role for phosphorus redox in emerging and modern biochemistry. *Current Opinion in Chemical Biology*, 49, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2018.09.018>
- Patade, V. Y., Bhargava, S., & Suprasanna, P. (2011). Salt and drought tolerance of sugarcane under iso-osmotic salt and water stress: Growth, osmolytes accumulation, and antioxidant defense. *Journal of Plant Interactions*, 6(4), 275–282. <https://doi.org/10.1080/17429145.2011.557513>
- Pérez-Gálvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2020). Carotenoids and chlorophylls as

- antioxidants. *Antioxidants*, 9(6), 1–39. <https://doi.org/10.3390/antiox9060505>
- Pierik, R., & Testerink, C. (2014). The art of being flexible: How to escape from shade, salt, and drought. *Plant Physiology*, 166(1), 5–22. <https://doi.org/10.1104/pp.114.239160>
- R Core Team. (2018). A Language and Environment for Statistical Computing. En *R Foundation for Statistical Computing*. <http://www.r-project.org/>.
- Rady, M. M., Kuşvuran, A., Alharby, H. F., Alzahrani, Y., & Kuşvuran, S. (2019). Pretreatment with Proline or an Organic Bio-stimulant Induces Salt Tolerance in Wheat Plants by Improving Antioxidant Redox State and Enzymatic Activities and Reducing the Oxidative Stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(2), 449–462. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9860-5>
- Raposo, J. L., Neto, J. A. G., & Sacramento, L. V. S. (2013). Evaluation of different foliar fertilizers on the crop production of sugarcane. *Journal of Plant Nutrition*, 36(3), 459–469. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.748066>
- Rathore, A., & Jasrai, Y. T. (2013). Growth and chlorophyll levels of selected plants with varying photosynthetic pathways (C3 , C4 and CAM). *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(2), 2–5.
- Roeber, V. M., Bajaj, I., Rohde, M., Schmülling, T., & Cortleven, A. (2021). Light acts as a stressor and influences abiotic and biotic stress responses in plants. *Plant Cell and Environment*, 44(3), 645–664. <https://doi.org/10.1111/pce.13948>
- Rosenfeld, A. H. (1956). *Sugar cane around the world*. University of Chicago Press; Sugar Publications.
- SAGARPA, & CONADESUCA. (2017). *Liberación de variedades comerciales de caña de azúcar REPORTE DE PROYECTO Septiembre 2017*.
- Sales, C. R. G., Ribeiro, R. V., Hayashi, A. H., Marchiori, P. E. R., Silva, K. I., Martins, M. O., Silveira, J. A. G., Silveira, N. M., & Machado, E. C. (2018). Flexibility of C4 decarboxylation and photosynthetic plasticity in sugarcane plants under shading. *Environmental and Experimental Botany*, 149, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.10.027>
- Sandoval-Vargas, J. M., Macedo-Osorio, K. S., Durán-Figueroa, N. V., Garibay-Orijel, C., & Badillo-Corona, J. A. (2018). Chloroplast engineering of *Chlamydomonas reinhardtii* to use phosphite as phosphorus source. *Algal Research*, 33, 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.06.003>
- Scandalios, J. G. (2002). The rise of ROS. *Trends in Biochemical Sciences*, 27(9), 483–486. [https://doi.org/10.1016/S0968-0004\(02\)02170-9](https://doi.org/10.1016/S0968-0004(02)02170-9)
- Schoefs, B. (2002). Chlorophyll and carotenoid analysis in food products. Properties of the pigments and methods of analysis. *Trends in Food Science and Technology*, 13(11), 361–371. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00182-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00182-6)

- Senge, M. O., Ryan, A. A., Letchford, K. A., MacGowan, S. A., & Mielke, T. (2014). Chlorophylls, Symmetry, Chirality, and Photosynthesis. *Symmetry*, 6(3), 781–843. <https://doi.org/10.3390/sym6030781>
- Sentías-Herrera, H. E., & Gómez-Merino, F. C. (2014). Nuevas directrices en mejoramiento genético de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *AGROProductividad*, 7(2), 9–15.
- Sentías-Herrera, H. E., Gómez-Merino, F. C., & Loyo-Joachin, R. (2016). El mejoramiento genético de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México: una historia de éxito con nuevos desafíos. *AGROProductividad*, 9, 8–13.
- Sentías-Herrera, H. E., Gómez-Merino, F. C., Valdez-Balero, A., Victoria Silva-Rojas, H., & Trejo-Téllez, L. I. (2014). The Agro-Industrial Sugarcane System in Mexico: Current Status, Challenges and Opportunities. *Journal of Agricultural Science*, 6(4), 26–54. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n4p26>
- Sentías-Herrera, H. E., Valdez-Balero, A., Loyo-Joachin, R., Flores-Revilla, C., & Trejo-Téllez, L. I. (2019). Nuevas variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) generadas por el Colegio de Postgraduados para el trópico húmedo mexicano. *AgroProductividad*, 12(12), 105–106. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1560>
- Showler, A. T. (2016). Selected abiotic and biotic environmental stress factors affecting two economically important sugarcane stalk boring pests in the United States. *Agronomy*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy6010010>
- SIAP. (2020). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>  
Disponible online: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (acceso: enero 2021).
- Silva, M. D. A., Da Silva, J. A. G., Enciso, J., Sharma, V., & Jifon, J. (2008). Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. *Scientia Agricola*, 65(6), 620–627. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600008>
- Singh, A., Lal, U. R., Mukhtar, H. M., Singh, P. S., Shah, G., & Dhawan, R. K. (2015). Phytochemical profile of sugarcane and its potential health aspects. *Pharmacognosy Reviews*, 9(17), 45–54. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.156340>
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. En *In: I.S.O.S.C. Proceeding 6th International Congress on Soilless Culture*. In: I.S.O.S.C. Proceeding 6th International Congress on Soilless Culture.
- Sumanta, N., Haque, C. I., Nishika, J., & Suprakash, R. (2014). Spectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents. *Research Journal of Chemical Sciences Res. J. Chem. Sci*, 4(9)(2231-606X), 63–69. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1340072>
- Suzuki, N., Rivero, R. M., Shulaev, V., Blumwald, E., & Mittler, R. (2014). Abiotic and biotic stress combinations. *New Phytologist*, 203(1), 32–43.

<https://doi.org/10.1111/nph.12797>

- Tanaka, R., & Tanaka, A. (2007). Tetrapyrrole biosynthesis in higher plants. *Annual Review of Plant Biology*, 58(March), 321–346. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105448>
- Thao, H. T. B., & Yamakawa, T. (2009). Phosphite (phosphorous acid): Fungicide, fertilizer or bio-stimulator? *Soil Science and Plant Nutrition*, 55(2), 228–234. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00365.x>
- Tokarz, B., Wójtowicz, T., Makowski, W., & Roman, J. J. (2020). What is the Difference between the Response of Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.) to Salinity and Drought Stress?— A Physiological Study. *Agronomy*, 10(833), 1–24. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060833>
- Vinas, M., Mendez, J. C., & Jiménez, V. M. (2020). Effect of foliar applications of phosphites on growth, nutritional status and defense responses in tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 265, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109200>
- Waclawovsky, A. J., Sato, P. M., Lembke, C. G., Moore, P. H., & Souza, G. M. (2010). Sugarcane for bioenergy production: An assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal*, 8, 263–276. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00491.x>
- Wang, J., Nayak, S., Koch, K., & Ming, R. (2013). Carbon partitioning in sugarcane (*Saccharum* species). En *Frontiers in Plant Science* (Vol. 4, Número JUN). <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00201>
- Wang, Y., Reiter, R. J., & Chan, Z. (2018). Phytomelatonin: A universal abiotic stress regulator. *Journal of Experimental Botany*, 69(5), 963–974. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx473>
- Xi, Y., Han, X., Zhang, Z., Joshi, J., Borza, T., Mohammad Aqa, M., Zhang, B., Yuan, H., & Wang-Pruski, G. (2020). Exogenous phosphite application alleviates the adverse effects of heat stress and improves thermotolerance of potato (*Solanum tuberosum* L.) seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190(November 2019), 110048. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110048>
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7(2049), 1–32. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Yamori, W., Hikosaka, K., & Way, D. A. (2013). Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: Temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research*, 119(1–2), 101–117. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6>
- Yu, Q., Shen, Y., Wang, Q., Wang, X., Fan, L., Wang, Y., Zhang, S., Liu, Z., & Zhang, M. (2019). Light deficiency and waterlogging affect chlorophyll metabolism and

photosynthesis in *Magnolia sinostellata*. *Trees - Structure and Function*, 33(1).  
<https://doi.org/10.1007/s00468-018-1753-5>

Zeng, Q., Ling, Q., Fan, L., Li, Y., Hu, F., Chen, J., Huang, Z., Deng, H., Li, Q., & Qi, Y. (2015). Transcriptome profiling of sugarcane roots in response to low potassium stress. *PLoS ONE*, 10(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126306>

Zhang, F. J., Zhang, K. K., Du, C. Z., Li, J., Xing, Y. X., Yang, L. T., & Li, Y. R. (2015). Effect of Drought Stress on Anatomical Structure and Chloroplast Ultrastructure in Leaves of Sugarcane. *Sugar Tech*, 17(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0337-y>

Zhao, G. Q., Ma, B. L., & Ren, C. Z. (2007). Growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence, and ion content of naked oat in response to salinity. *Crop Science*, 47, 123:131. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0371>

Zhu, J. K. (2002). Salt and Drought Stress Signal Transduction in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 53(1), 247–273. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.53.091401.143329.Salt>

Zhu, J. K. (2016). Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. *Cell*, 167(2), 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>