

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DEL PASTO NAVAJITA**

***AZUL (Bouteloua gracilis)* EN AMBIENTES CON**

**CONCENTRACIONES ELEVADAS DE CO<sub>2</sub>**

**POR:**

**ING. PAVEL OMAR ERIVES RODRÍGUEZ**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER**

**EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON ÁREA**

**MAYOR EN RECURSOS NATURALES**



Comportamiento fisiológico del pasto navajita azul (*Bouteloua gracilis*) en ambientes con concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>. Tesis presentada por Pavel Omar Erives Rodríguez como requisito parcial para obtener el título de Maestro en Ciencias, ha sido aceptada y aprobada por:

---

Ph. D. Carlos Ortega Ochoa  
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

---

D. Ph. Agustín Corral Luna  
Secretario de Investigación y Posgrado

---

D. Ph. Ana Luisa Rentería Monterrubio  
Coordinadora del Posgrado

---

Ph. D. Federico Villarreal Guerrero  
Presidente

10 - mayo - 2019

---

Fecha

Comité:

Ph. D. Federico Villarreal Guerrero  
Ph. D. Alicia Melgoza Castillo  
Dr. Eduardo Santellano Estrada  
Dr. Carlos Raúl Morales Nieto

© Derechos Reservados  
AUTOR: PAVEL OMAR ERIVES RODRÍGUEZ  
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO FRANCISCO R.  
ALMADA KM. 1, CHIHUAHUA, CHIH.,  
MÉXICO C.P. 31453  
MAYO DE 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al CONACYT por su apoyo económico. Un sincero agradecimiento al Dr. Federico Villarreal Guerrero que gracias a su tiempo y dedicación se desarrolló satisfactoriamente este documento. Le agradezco también por facilitarme los materiales que se han necesitado durante el desarrollo de la presente investigación, muchas gracias por todo el apoyo profesor.

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional, por mostrarme el camino del estudio y los consejos que siempre me han dado, agradezco a Dios por permitirme tomar un camino profesional y de bien.

## **DEDICATORIA**

Dedico la siguiente tesis fruto de un gran trabajo y esfuerzo a mi madre que ha fomentado en mi la responsabilidad y el deseo de superarme, a ella que ha estado con su apoyo incondicional durante toda mi vida.

A los profesores que han estado ayudándome a mejorar en el espacio académico, especialmente al Dr. Federico Villarreal Guerrero que me ha apoyado con el desarrollo del escrito y la investigación además de haberme ofrecido su amistad sincera y haberme apoyado incondicionalmente para llegar a ser un profesional de éxito.

## CURRICULUM VITAE

El autor nació el 11 de noviembre de 1992 en la Ciudad de Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

2007-2010                      Estudios de Técnico Forestal en el CECFOR 1, Uruapan, Michoacán, México.

2011-2013                      Estudios de Técnico Superior Universitario en la Universidad Tecnológica de la Babícora, Namiquipa, Chih., México.

2013-2015                      Estudios de Licenciatura en Ingeniería en Agricultura Sustentable y Protegida de la Universidad Tecnológica de la Tarahumara, Guachochi, Chih., México.

2016-2017                      Estudiante del Programa Educativo de Maestría en Ciencias en Producción Animal y Recursos Naturales, el cual se imparte en la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Chih., México.

## RESUMEN

### COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DEL PASTO NAVAJITA AZUL (*Bouteloua gracilis*) EN AMBIENTES CON CONCENTRACIONES ELEVADAS DE CO<sub>2</sub>

POR:

I. A. S. P. PAVEL OMAR ERIVES RODRÍGUEZ

Maestría en Ciencias en Producción Animal y Recursos Naturales

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera se han elevado significativamente desde la época pre-industrial hasta la actualidad. Más aún, se pronostica que dichas concentraciones se duplicarán con respecto a las de la actualidad en el próximo siglo. Aunque investigaciones pasadas han abordado el tema de la respuesta de las plantas con ruta fotosintética C<sub>3</sub> a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>, poco se sabe aún sobre el desempeño de plantas C<sub>4</sub> en esas condiciones. Este estudio evaluó las respuestas fisiológicas de *Bouteloua gracilis* a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>. *B. gracilis* es una especie con ruta fotosintética C<sub>4</sub>, la cual es nativa e importante para el ganado y alimentación de fauna silvestre en el Desierto Chihuahuense. En tres invernaderos a escala se mantuvieron concentraciones de CO<sub>2</sub> de 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  y 500  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . Un tercer invernadero se mantuvo a concentración ambiental (380  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ), el cual fue considerado como control. Durante nueve semanas

se midieron respuestas morfológicas y fisiológicas en la especie. En general, las concentraciones evaluadas presentaron efectos no significativos ( $p>0.05$ ) en el desempeño de la especie; excepto por la variable altura de planta, la cual resultó con valores superiores en el ambiente a una concentración de  $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$  ( $p<0.05$ ). Además, las plantas desarrolladas en ambientes con concentraciones de  $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$  mostraron mayor precocidad reproductiva. Los tratamientos aplicados no mostraron efectos positivos significativos ( $p>0.05$ ) sobre la transpiración y rendimiento de *B. gracilis*. Se recomienda elevar las concentraciones de  $\text{CO}_2$  por encima de  $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$  para determinar si existen efectos positivos.

**Palabras clave:** transpiración, rendimiento, cambio climático, IPCC.

## ABSTRACT

PHYSIOLOGICAL PERFORMANCE OF BLUE GRAMA (*Bouteloua gracilis*)  
UNDER ENVIRONMENTS WITH ELEVATED CONCENTRATIONS OF CO<sub>2</sub>

BY:

PAVEL OMAR ERIVES RODRÍGUEZ

Concentrations of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the atmosphere have significantly increased from the pre-industrial age to our times. Moreover, such concentrations are expected to double with respect to the current concentrations in the next century. Although previous research has studied about the physiological responses of plants with the C<sub>3</sub> photosynthetic pathway, little is known about the responses of C<sub>4</sub> plants under enriched CO<sub>2</sub> environments. This study evaluated physiological responses of *Bouteloua gracilis* under elevated concentrations of CO<sub>2</sub>. *B. gracilis* is a species with the C<sub>4</sub> photosynthetic pathway, which is native and plays a key role for the grazing of cattle and the feeding of wildlife in the Chihuahuan Desert. Concentrations of 800 μmol mol<sup>-1</sup>, 500 μmol mol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub> were maintained in two greenhouses built to scale. A third greenhouse was maintained at environmental concentrations (380 μmol mol<sup>-1</sup>) and served as control. During nine weeks, both physiological and morphological plant responses were measured on the species. In general, the concentrations applied seem not to have a significant effect ( $p>0.05$ ) in the performance of the species; except for the variable plant height, which resulted with the highest values in the environment concentrated at 800 μmol mol<sup>-1</sup> ( $p<0.05$ ). In addition, the plants growing under the environment concentrated at 800 μmol mol<sup>-1</sup> showed precocity. The treatments applied did not show significant positive effects ( $p>0.05$ )



on the transpiration and dry mass production of *B. gracilis*. It is recommended to rise the concentration of this gas at levels higher than 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  to determine if there exist positive effects.

**Key words:** transpiration, yield, climate change, IPCC.

## CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
CURRICULUM VITAE.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Cambio Climático.....	3
Gases de efecto invernadero.....	3
Calentamiento global.....	4
Cambio ambiental global.....	4
Efectos del Cambio Climático sobre el Ambiente.....	6
Respuestas de las Plantas C <sub>4</sub> Ante el Cambio Climático.....	8
Los Pastizales.....	8
Importancia de la Ganadería en el Estado de Chihuahua .....	9
Transpiración.....	10
Los Estomas .....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Ubicación .....	14
Generalidades del Pasto Navajita Azul ( <i>Bouteloua gracilis</i> ).....	14
Descripción Botánica .....	14

Conducción del Experimento .....	15
Análisis Estadístico .....	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
LITERATURA CITADA.....	31

## LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Descriptores morfológicos de <i>Bouteloua gracilis</i> en ambientes con concentraciones elevadas de CO <sub>2</sub> en el aire .....	21
2	Descriptores fisiológicos de <i>Bouteloua gracilis</i> en ambientes con concentraciones elevadas de CO <sub>2</sub> en el aire .....	23
3	Análisis del gasto de agua de <i>Bouteloua gracilis</i> en ambientes con concentraciones elevadas de CO <sub>2</sub> en el aire .....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Temperatura media global de la superficie del planeta. Datos históricos y proyecciones hasta el año 2100 (Fuente: IPCC, 2014).....	7
2	Gasto de agua semanal de <i>Bouteloua gracilis</i> en tres ambientes con diferentes concentraciones de CO <sub>2</sub> en el aire .....	26

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la temperatura media del sistema climático del planeta tierra es inequívoco y desde 1950 muchos de los cambios del clima observados no tienen precedentes, comparado con su comportamiento desde hace miles de años. La atmosfera y el océano se han calentado, la cantidad de nieve en la tierra ha disminuido y el nivel del mar ha aumentado (IPCC, 2014). Con base en el reporte de los expertos que conforman el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), se prevé que al final del siglo XXI el nivel de CO<sub>2</sub> en la atmosfera sea de 750 a 1300  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . También, se prevé la temperatura media que aumentara de 1.8 a 6 °C. Si ésto se vuelve una realidad, existe incertidumbre sobre como algunas especies de plantas, de interés ecológico y económico, se desempeñarán ante escenarios del cambio climático. Incluso, existe la incógnita si dichas especies tendrán la capacidad de adaptarse y sobrevivir.

El pasto navajita azul (*Bouteloua gracilis*) es una gramínea nativa de Norteamérica que se caracteriza por su amplia distribución, alto valor forrajero y resistencia a la sequía (Madrid *et al.*, 2009). Esta especie se encuentra distribuida prácticamente en todo el desierto Chihuahuense (García y Villa, 1977; Beltrán *et al.*, 2010) y representa una fuente importante de alimentación para el ganado en pastoreo en toda esta región. La importancia forrajera de esta especie ha sido ampliamente descrita en trabajos previos (Morales y Melgoza, 2010; Anderson, 2003; Beltrán *et al.*, 2010; Madrid *et al.*, 2009).

Hasta el momento, no existen estudios que determinen cual sería el desempeño fisiológico de *B. gracilis* ante un cambio ambiental global. Como parte del cambio climático se infiere que algunas especies de plantas pudieran perecer

o ver su desempeño fisiológico seriamente afectado. Uno de los procesos fisiológicos que en primera instancia se verían afectados sería la transpiración de las plantas, la cual está estrechamente relacionada con el rendimiento de estas (Villarreal-Guerrero *et al.*, 2012; Ping *et al.*, 2015). Estudios de este tipo brindarían certidumbre sobre el futuro de algunas especies ante las adversidades del cambio climático. Asimismo, este conocimiento serviría de base para la toma de decisiones sobre el manejo y conservación de especies vegetales en el futuro. Sin embargo, hasta el momento los estudios sobre las capacidades fisiológicas de plantas ante escenarios de cambio climático son limitados. Por lo tanto, el objetivo fue determinar los efectos de escenarios del cambio climático sobre los descriptores morfológicos y fisiológicos de *Bouteloua gracilis*.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Cambio Climático

**Gases de efecto invernadero.** Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos gases presentes en el sistema climático del planeta tierra, que tienen la capacidad de atrapar y emitir radiación en el rango del infrarrojo. Esto provoca el calentamiento de la atmósfera. De no existir estos gases, la tierra estaría a una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ , continuamente (Martínez y Fernández, 2004). Los principales gases que conforman a los GEI son el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), así como los compuestos hidrofluorocarbonados (HCFC) y clorofluorocarbonados (CFC).

La incremento de la emisión de los GEI se ha producido en gran medida por la quema indiscriminada de combustibles fósiles. Dichos combustibles se emplean como fuente de energía para la producción de electricidad, transporte y operación de fábricas, principalmente. La agricultura, la cría de ganado, la reducción del área ocupada por los bosques, el cambio de uso de suelo y en general las actividades antropogénicas contribuyen también a la emisión de GEI a la atmósfera (Alonso *et al.*, 1996).

La emisión de gases de origen antropogénico se ha incrementado a partir de la era pre-industrial. El crecimiento económico y poblacional son dos grandes causas. Las emisiones de estos gases nunca habían sido mayores que en la actualidad. Esto ha resultado en concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso que no tienen precedente en los últimos 800,000 años.

A partir del inicio de la revolución industrial, alrededor de los años 1750's, la concentración de los GEI en la atmósfera se ha incrementado rápidamente.



Esto ha causado un aumento a la temperatura media de la atmosfera (IPCC, 2014). A este fenómeno se le conoce como calentamiento global.

**Calentamiento global.** El fenómeno conocido como calentamiento global ocurre con la absorción de rayos solares, emitidos en el rango infrarrojo del espectro electromagnético. Los gases presentes en la atmósfera absorben dichos rayos en forma de calor. Este calor se redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas. Una parte de los rayos es reemitida fuera de la atmosfera. La cantidad reemitida es menor que la recibida y el efecto es el aumento de la temperatura (Martinez y Fernández, 2004).

Los efectos de los GEI, junto a otros promotores de origen antropogénico, se han detectado en el sistema climático del planeta y es altamente probable que sean la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo 20 (IPCC, 2014). El calentamiento del sistema climático es inequívoco y desde 1950 muchos de los cambios observados en el comportamiento del clima no tienen precedentes, comparado con el comportamiento del clima desde hace miles de años. La atmosfera y el océano se han calentado, la cantidad de nieve en la tierra ha disminuido y el nivel del mar ha aumentado (IPCC, 2014).

Las mediciones periódicas que se han realizado de la temperatura, muestran un aumento de cerca de 1°C desde 1980 y se observa que dicho aumento va ligado al aumento de CO<sub>2</sub> en la atmosfera (Caballero *et al.*, 2007). El calentamiento global, provoca un cambio ambiental global.

**Cambio ambiental global.** Debido al fenómeno del calentamiento global, tenemos ahora una atmósfera más caliente. Esto es, desde el punto de vista termodinámico, un sistema con mayor energía interna. Un sistema con cada vez

más energía interna puede realizar, a su vez, más trabajo. Esto significa que el sistema climático puede producir eventos más extremos.

El calentamiento global del planeta conlleva a un cambio en el comportamiento global del sistema climático de la tierra. Por ejemplo, en un planeta 2°C más caliente, comparado con la época pre-industrial, eventos climáticos extremos que se esperaban ocurrieran cada 30 años, ocurrirán cada 10-20 años (Fischer y Knutti, 2015). El comportamiento del clima ha cambiado notoriamente, especialmente en las últimas décadas. Esto se ha constatado con datos de anomalías de temperatura de la superficie de la tierra (Hansen *et al.*, 2010).

La influencia de la humanidad sobre el sistema climático de la tierra es evidente. Las emisiones antropogénicas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. Los impactos por los cambios climáticos recientes se han esparcido y han sido sentidos por toda la humanidad, con efectos en todos los ecosistemas (IPCC, 2014).

Más aún, los expertos del IPCC desarrollaron proyecciones con base en escenarios donde predicen la temperatura media del planeta para el futuro. Estos escenarios están basados en vías de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), las cuales predicen que tan alto será el forzamiento radiativo de la atmósfera (capacidad de absorber energía térmica), dependiendo de la concentración de los GEI en la atmósfera. Todos los escenarios, desde el menos adverso (RCP 2.6) hasta el más hostil (RCP 8.5) contemplan un incremento de la temperatura media del planeta (Figura 1).

Según los expertos que conforman el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2014), se prevé que al final del siglo XXI el nivel de CO<sub>2</sub> en la atmosfera sea de 750 a 1300  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . Se prevén también aumentos en la temperatura media de 1.8 a 6 °C. Lo anterior, con base en los escenarios que dicho Panel ha previsto.

### **Efectos del Cambio Climático Sobre el Ambiente**

A causa del fenómeno del cambio climático se prevén cambios en la evapotranspiración de las plantas, cambios en los caudales de escurrimientos, cambios en la calidad del agua y otros daños en el medio ambiente (Martínez y Aguilar, 2009).

Los expertos del IPCC prevén que la precipitación disminuirá entre 5-20 % para la zona del Desierto Chihuahuense, dependiendo de la estación del año. Asimismo, prevén que el nivel de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmosfera aumentará de 750 a 1300  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . Esto a su vez causará aumentos en la temperatura media del aire del planeta de 1.8 a 6 °C (IPCC, 2014).

Con respecto a la afectación de la flora, se prevé que en general, las plantas se verán beneficiadas por el aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, especialmente aquellas especies que poseen una ruta fotosintética C<sub>3</sub>. Esto también les permitirá soportar temperaturas ligeramente mayores. Sin

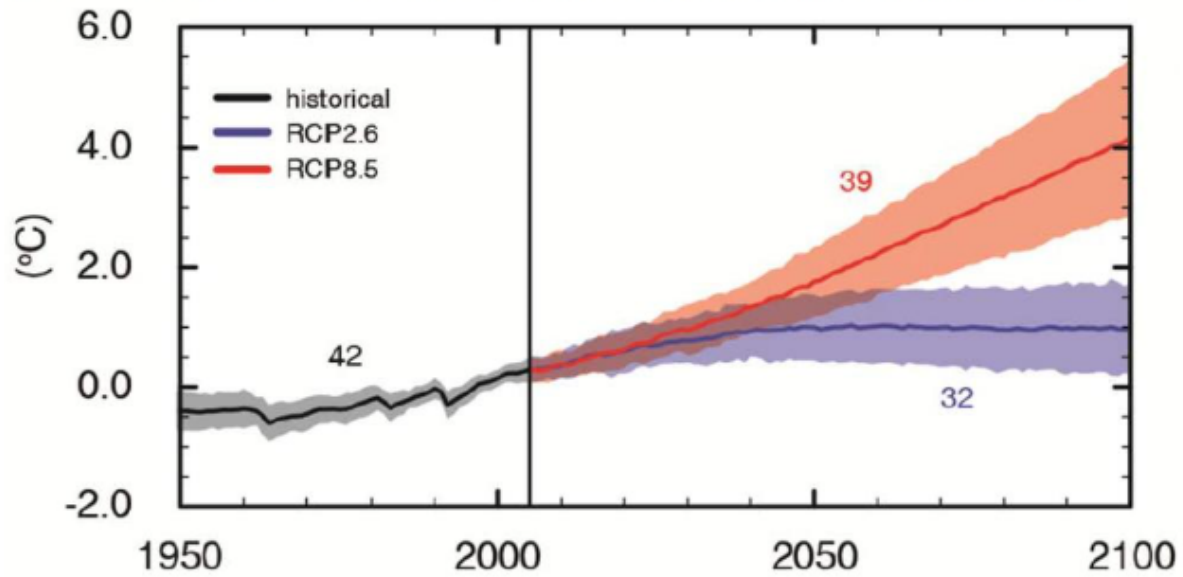


Figura 1. Temperatura media global de la superficie del planeta. Datos históricos y proyecciones hasta el año 2100 (Fuente: IPCC, 2014).

embargo, un mayor secuestro de CO<sub>2</sub> conlleva a una mayor demanda de agua y nutrientes. Los expertos del IPCC proyectan cambios en los patrones de precipitación, con reducciones en la precipitación anual de hasta un 20% para el Desierto Chihuahuense.

### **Respuestas de Plantas C<sub>4</sub> Ante el Cambio Climático**

Las plantas C<sub>4</sub> muestran mayores tasas de fotosíntesis en condiciones áridas con altas temperaturas. Éstas pudieran adaptarse más al cambio climático que las plantas con ruta fotosintética C<sub>3</sub> (Sague y Kubien, 2003). El proceso de fotosíntesis tipo C<sub>3</sub> se originó por la necesidad de la enzima RuBisCo de realizar el proceso en altas concentraciones de oxígeno y reducir la tasa de fotorespiración (Sague *et al.*, 2012).

Por tener el tipo de fotosíntesis C<sub>4</sub>, los pastos logran tener mejor eficiencia en la producción en ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub> y en condiciones de déficit hídrico, en comparación con las plantas C<sub>3</sub> (Reich *et al.*, 2018). Sin embargo, el conocimiento sobre las respuestas de las plantas C<sub>4</sub> ante el cambio climático, específicamente ante concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>, es limitado y los pocos estudios llevados a cabo a la fecha reportan hallazgos contradictorios (Reddy *et al.*, 2010). Las condiciones ambientales que incluyen concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> y déficit hídrico parecen favorecer la eficiencia en el uso del agua de las plantas C<sub>4</sub>; sin embargo, aún no es claro si con una mayor demanda de fotosíntesis, los nutrientes disponibles en el suelo se vuelvan limitados.

### **Los Pastizales**

Los pastizales son ecosistemas naturales utilizados para la producción ganadera, la cual tiene como fin el producir alimento y materias primas para

vestir, además de proporcionar servicios ambientales y proveer hábitat a la fauna silvestre (White *et al.*, 2000).

Con base en lo reportado por Challenger (1998), en las comunidades de pastizales del Desierto Chihuahuense predominan los pastos con pocos árboles y arbustos. En los pastizales áridos, las especies comunes son: pasto navajita azul (*Bouteloua gracilis*), pasto búfalo (*Buchloe dactyloides*), popotillo plateado (*Botriochloa barbinodis*), pasto llanero (*Eragrostis intermedia*), pasto colorado (*Heteropogon contortus*), toboso (*Hilaria mutica*), gigante (*Leptochloa dubia*), pasto lobo (*Muhlenbergia phleoides*) y pasto araña (*Muhlenbergia porteri*). Otras especies son rosetilla (*Cenchrus insertus*), papalote (*Chloris crinita*), pasto bermuda (*Cynodon dactylon*), punta blanca (*Digitaria californica*), pasto salado (*Distichlis spicata*) y pasto borreguero (*Erioneuron pulchellum*).

### **Importancia de la Ganadería en el Estado de Chihuahua**

La ganadería es una de las actividades económicas más importantes en el estado de Chihuahua. Esta actividad se basa en su mayoría en el pastoreo de ganado en agostaderos (ganadería extensiva). Para ello, en el estado se cuenta con agostaderos que incluyen tanto especies nativas como introducidas, lo cual le ha permitido a la entidad sostenerse como uno de los principales productores de ganado en el país. De acuerdo a los resultados del VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, Chihuahua aporta 5.1 % del ganado bovino al inventario nacional, con una población de 2 322 144 cabezas distribuidas en unidades de producción y viviendas. La explotación de ganado bovino es de gran importancia en la entidad, registrando 1 708 887 cabezas en el año 2007 (INEGI, 2007).

El sistema productivo vaca-cría en Chihuahua se realiza en una superficie de 17.5 millones de hectáreas de pastizales y matorrales con un hato ganadero de 990 mil cabezas y participa con un 5 % del PIB del hato ganadero nacional (Báez-González *et al.*, 1999). Este sistema es de gran importancia en México ya que a partir de este modo de producción se proporciona alimento, materias primas y empleos en el estado (Callejas-Juárez *et al.*, 2014).

### **Transpiración**

La transpiración de las plantas es la liberación de agua, en forma de vapor, a través de sus estomas. Este proceso está influenciado en gran medida por las condiciones del medio ambiente, el cual interactúa con la planta y afecta la tasa de transpiración. Las plantas absorben el agua del suelo y la transportan en forma líquida por el xilema hacia sus hojas. De toda el agua absorbida por las plantas, solo el 5 % es aprovechada para su crecimiento (USDA, 2005; Allen *et al.*, 2006).

En las plantas no leñosas, el agua representa cerca del 70 % de su peso total, siendo una de sus funciones el permitir que las plantas realicen procesos esenciales como la fotosíntesis. Para que se pueda realizar dicho proceso, las plantas deben obtener CO<sub>2</sub> de la atmósfera. El gas fluye a través de los estomas, los cuales con su apertura permiten el intercambio del gas entre la planta y la atmósfera; sin embargo, el riesgo de pérdida de agua es alto (Perez, 2009).

La transpiración de las plantas está estrechamente ligada a la producción de biomasa porque los estomas son la vía de entrada del CO<sub>2</sub> y la vía de salida del agua (Medrano *et al.*, 2007). Durante la sequía, el cierre de estomas afecta directamente la transpiración, la fotosíntesis y en consecuencia la producción.

La transpiración, al igual que la evaporación, depende de factores como la incidencia de radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento. La diferencia en la anatomía de las hojas afecta la transpiración del cultivo; por lo tanto, éste fenómeno varía de acuerdo a las etapas fenológicas de las plantas (Allen *et al.*, 2006) y al tipo de metabolismo fotosintético que posean. Así, las especies con ruta fotosintética C<sub>4</sub> son más eficientes en el uso del agua, lo cual se estima como la relación entre transpiración y producción de biomasa, comparado con los cultivos C<sub>3</sub> (Molden, 2007).

Cabe mencionar que la humedad del suelo está estrechamente ligada con este fenómeno, ya aquí es donde las plantas encuentran el suministro de agua. La humedad del suelo influye tanto en la transpiración de las plantas como en la evaporación de la humedad del suelo (Sanchez, 2001). A la combinación de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo se le conoce como evapotranspiración. Dicho concepto es comúnmente usado, ya que es difícil discriminar la cantidad de agua evaporada por evaporación y por transpiración. Este efecto es de suma importancia ya que es esencial para la producción de los cultivos (Molden, 2007). La evaporación de la humedad del suelo ocurre principalmente por la incidencia de la radiación solar, lo que hace notar que al ir desarrollando follaje la planta, la evaporación tiende a disminuir (Allen *et al.*, 2006).

Para producir un gramo de biomasa, las plantas requieren de 100 a 1000 g de agua, dependiendo del tipo de planta y de las condiciones ambientales. En la década de los 60's, se demostró que las plantas con fotosíntesis C<sub>4</sub> son más eficientes en el uso del agua que las plantas C<sub>3</sub> (Medrano *et al.*, 2007).



Un aspecto positivo de la transpiración es contribuir a la regulación de la temperatura de las hojas. Algunas especies controlan la cantidad de hojas de modo que en la sequía pueden perder una parte o la totalidad de ellas. Otras especies no tienen hojas y son los tallos los que realizan directamente la fotosíntesis. Alternativamente, algunas plantas aumentan el grosor de la hoja para así disminuir el riesgo de pérdida de agua. En algunas especies se observa que el aumento en el grosor de la hoja, va acompañado de un aumento en la capa de cera.

Se piensa que a mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en el ambiente, asociado con el cambio climático, las plantas aumentaran la productividad de agua por unidad de evapotranspiración, debido a que la capacidad de captura de carbono se aumenta, lo cual se traduce en una mayor tasa de fotosíntesis (Droogers y Aerts, 2005).

### **Los Estomas**

Los estomas de las plantas son poros o aberturas regulables del tejido epidérmico, formados por un par de células especializadas llamadas células oclusivas. La apertura de estomas es el principal mecanismo al que se debe la pérdida de agua en las plantas. Los estomas responden rápidamente a los aumentos de CO<sub>2</sub> y temperatura.

La radiación solar, el agua, la temperatura y la concentración del CO<sub>2</sub> son variables ambientales que afectan la apertura y cierre de los estomas. Los estomas se abren en presencia de radiación y se cierran en condiciones de obscuridad; sin embargo, en condiciones de sequía tienden a cerrarse aunque haya radiación disponible para evitar pérdida de agua (Taiz y Zeiger, 2006). Si la

transpiración se reduce por algún motivo, de igual manera lo hará la absorción de nutrientes, en consecuencia, el rendimiento o producción de biomasa se verá afectado (Huertas, 2008).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación

El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero durante el periodo marzo-junio de 2017 en la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Ésta se encuentra ubicada en el km 1 del Periférico Fco. R. Almada, en Chihuahua, Chih., en las coordenadas 28° 35' 10" N y 106° 06' 30" O, a una altitud de 1435 m.

### Generalidades del Pasto Navajita Azul (*Bouteloua gracilis*)

*Bouteloua gracilis* es una especie de gran importancia por su amplia distribución y alto valor forrajero (Jurado-Guerra *et al.*, 2006). Se encuentra en gran parte del territorio norte de la república mexicana y en los estados sureños de Estados Unidos (García y Villa, 1977; Beltrán *et al.*, 2010). El pasto navajita azul crece en sitios con altitudes desde 1500 a 2200 m, se presenta en zonas áridas y semiáridas, en pastizales naturales, matorrales y bosques de mezquite y huizache (García y Villa, 1977). Es un pasto perenne dominante en los pastizales semiáridos de Norteamérica, donde es considerada una de las especies clave más importante del pastizal semiárido de México (Jaramillo, 1986). Esta especie representa una fuente importante de alimentación para el ganado en pastoreo en toda esta región y su importancia forrajera ha sido ampliamente descrita en trabajos previos (Morales y Melgoza, 2010; Anderson, 2003; Beltrán *et al.*, 2010; Madrid *et al.*, 2009).

### Descripción botánica

*Bouteloua gracilis* es una planta perenne y puede llegar a medir 70 cm de altura, tiene hojas alternas y presenta tres espigas persistentes, dispuestas sobre

un eje en forma de racimo, espiguillas de color verde con tintes púrpura en la madurez y raíz fibrosa (Wipff, 2003). El desarrollo de esta especie comienza con las primeras lluvias. Sin embargo, en las condiciones limitantes de agua que existen en las regiones semiáridas, las plántulas tienden a deshidratarse. Lo anterior debido al gran tamaño del entrenudo subcoleoptilar en donde se encuentra el meristemo apical. Este meristemo es el encargado de generar raíces adventicias que mantienen la supervivencia de plantas adultas. Las raíces adventicias se desarrollan cerca del suelo superficial donde las condiciones son desfavorables para las plantas (Moreno-Gómez *et al.*, 2012). Se estima que el rendimiento de *Bouteloua gracilis* en condiciones de temporal es de 950 kg h<sup>-1</sup> de materia seca dentro de una altitud de 1,882 m (Beltrán *et al.*, 2010).

### **Conducción del Experimento**

El estudio se inició con el establecimiento de tres módulos experimentales en el invernadero. Dentro del invernadero, tres estructuras de invernadero se construyeron a escala. Estas estructuras contaban con una superficie de 1.5 m<sup>2</sup> (1.5 x 1.0 m), con diseño tipo capilla y una altura a la cumbrera de 1.5 m.

A cada una de los invernaderos a escala fue aplicado un tratamiento distinto. El primer tratamiento incluyó la inyección de CO<sub>2</sub> para mantener una concentración de 500 μmol mol<sup>-1</sup> en el ambiente. El segundo tratamiento incluyó la inyección de CO<sub>2</sub> para mantener una concentración de 800 μmol mol<sup>-1</sup> en el ambiente. Por su parte, el tercer tratamiento con incluyó la inyección de CO<sub>2</sub>; manteniéndose una concentración ambiental de este gas, con un valor aproximado de 380 μmol mol<sup>-1</sup>. El aumentar las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la

atmósfera de los invernaderos tuvo la finalidad de simular escenarios del cambio climático, con base en el informe de los expertos del IPCC (IPCC, 2014).

El mantenimiento de los niveles de CO<sub>2</sub> dentro del primer y segundo invernadero fue posible a través del monitoreo de las concentraciones de este gas (GMT222, Vaisala Inc. Helsinki, Finlandia; 0-2000 ppm, +/- 1.5%), con la operación de una válvula selenoide (2W-025-08, CEIV, México; AC 120 V) y con un regulador con flujómetro para CO<sub>2</sub> (COR\*RFCO2, Cortec-Okila, CDMX, México), conectados directamente a un cilindro de acero industrial de 25 kg de CO<sub>2</sub> de capacidad (INFRA, México). Esta configuración se instaló de manera idéntica para los invernaderos a escala uno y dos. La obtención de datos de concentración de CO<sub>2</sub> y el control de las válvulas solenoides, se llevó a cabo con el uso de un datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT). Los monitores de CO<sub>2</sub> y las válvulas solenoides se configuraron desde el datalogger con la ayuda del software CRBasic (ver. 4.2.1.1, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT).

Cada planta fue sembrada y crecida en una maceta. Las macetas fueron llenadas con suelo de campo. Cada maceta fue cubierta con una película de plástico en la base de la planta para evitar la evaporación de agua proveniente del sustrato de la maceta.

Cada invernadero a escala contó con ocho unidades experimentales o repeticiones. Cada unidad experimental fue representada por una planta de *Bouteloua gracilis*. La duración del experimento fue de 13 semanas, periodo en el que las plantas estuvieron expuestas continuamente a las concentraciones de CO<sub>2</sub> designadas.

La transpiración de las plántulas se estimó cada semana por diferencia de pesos. Primeramente, el peso inicial de la maceta se tomó antes de aplicar un riego de 0.41 kg de agua. Después de aplicar el riego se esperaba 15 min para obtener un segundo peso. A la siguiente semana se repitió el procedimiento y se determinó la transpiración total por semana. Para ello, al segundo peso, tomado la semana anterior, se le restó el primer peso, tomado la semana posterior.

Para la medición del desarrollo vegetativo se registró la altura de la planta y diámetro de macollo. Esto se hizo cada semana, a partir del inicio de la investigación. Asimismo, semanalmente se registró la presencia de inflorescencia en las plantas experimentales. Al final del experimento se tomaron medidas de altura de forraje, número de tallos, ancho de hoja, largo de hoja, altura de forraje, altura total de planta, inflorescencia y número de espigas.

La producción total de biomasa aérea se determinó por medio de el corte de ésta a cada planta. Posteriormente, dicha biomasa se almacenó en bolsas de papel a temperatura ambiente durante 45 días y una vez secas las muestras, se determinó materia seca. En el caso de las raíces, éstas se lavaron para librarlas de la tierra y se aplicó el mismo procedimiento de secado para determinar la producción de biomasa radicular.

Una de las variables evaluadas en las plantas experimentales fue el desarrollo de la inflorescencia. Al final del experimento se contaron el número de plantas con inflorescencia por tratamiento. Por otro lado, se midió también la precocidad, la cual tomó en cuenta el tiempo de aparición de la inflorescencia. La presencia temprana de la inflorescencia se consideró cuando se presentó durante la semana uno a la semana 10. Por su parte, la presencia tardía de la

inflorescencia se consideró en el caso en el que las plantas desarrollaron su inflorescencia de la semana 10 hasta el final del experimento; o bien, cuando las plantas no presentaron inflorescencia. La presencia de la inflorescencia en las plantas se clasificó en dos parámetros, el primer parámetro se asignó para el caso en que la planta logró desarrollar inflorescencia antes de la semana 10; el segundo parámetro correspondió cuando la planta no logró producir inflorescencia antes de ese periodo.

### **Análisis Estadístico**

Para analizar cada una de las variables se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA). Asimismo, se realizó la prueba LSD (mínima diferencia significativa) para la separación de medias cuando al menos uno de los tratamientos presentó un efecto significativo sobre dicha variable.

$$Y_{ij} = m + c_i + e_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$  = variable de respuesta medida en la maceta  $j$  del nivel de  $CO_2$ .

$m$  = media general.

$c_i$  = el efecto del nivel  $i$  de  $CO_2$ .

$e_{ij}$  = el efecto del error aleatorio de la maceta  $j$  del nivel  $i$  de  $CO_2$ .

Se asume que los errores  $e_{ij}$  se distribuyen de manera idéntica, independiente y de manera normal con media 0 y varianza  $\sigma^2$ .

Para la variable de gasto de agua se realizó un ANOVA utilizando el procedimiento mixed con el programa SAS, con medidas repetidas a través del tiempo. Para este análisis se tomó como covariable la humedad en la planta. El modelo que se utilizó fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + S_j + CS_{ij} + E_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = la maceta  $k$  del nivel  $i$  de  $CO_2$  durante la semana  $j$ .

$\mu$  = media general.

$C_i$  = efecto del nivel  $i$  de  $CO_2$ .

$S_j$  = el efecto de la semana  $j$ .

$CS_{ij}$  = efecto de la interacción entre el nivel  $i$  de  $CO_2$  y la semana  $j$ .

$E_{ijk}$  = el efecto del error aleatorio de la maceta  $k$  del nivel  $i$  de  $CO_2$  en la semana  $j$ .

Se asume que los  $E_{ijk}$  se distribuyen uniformemente.

En el caso de las variables denominadas desarrollo de inflorescencia y precocidad Se realizaron dos pruebas estadísticas no paramétricas para los datos de presencia de inflorescencia y periodo tomado por las plantas para el desarrollo de la inflorescencia.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del comportamiento de *Bouteloua gracilis* en ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub> en el aire se muestran en el Cuadro 1. En general, los ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub> no mostraron un efecto para la mayoría de los descriptores morfológicos medidos. Sin embargo, en la semana 2, 3, 5 y 6 se encontró un efecto significativo en transpiración debido al efecto de la interacción ambiente\*semana. Estos resultados coinciden con algunos reportados en especies similares como maíz y sorgo, las cuales llevan a cabo el proceso fotosintético por la misma ruta (C<sub>4</sub>) que *Bouteloua gracilis* (Kimball, 2016). Al parecer, las respuestas de las plantas C<sub>4</sub> a los niveles elevados de CO<sub>2</sub> se presentan en condiciones de sequía, únicamente. Resultados contrastantes a los encontrados en el estudio por Kimball (2016) fueron reportados en otros estudios. Por ejemplo, Ottman *et al.* (2001) y Wu *et al.* (2009) encontraron un aumento en la producción de biomasa aérea de sorgo en ambientes con concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, Reddy *et al.* (2010) establecieron que los hallazgos sobre las respuestas de las plantas al cambio climático son aun contradictorias. Por ello, es importante aportar más conocimiento nuevo sobre este importante tema.

Para el caso de la variable altura de planta, los mayores valores se registraron en el ambiente con la mayor concentración de CO<sub>2</sub> (800 μmol mol<sup>-1</sup>). Este resultado fue similar al reportado por Driscoll *et al.* (2006), donde se registró que plantas de maíz ganaron mayor altura en ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub> en el aire. Los autores reportan que la ganancia en altura se debió probablemente a una elongación celular. Otros estudios reportan mayor crecimiento vegetativo

Cuadro 1. Descriptores morfológicos sobre el desempeño de *Bouteloua gracilis* en ambientes con concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en el aire

Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)	AF	AP	NT	DM	GT	AH	LH	AFO
380	24.7±1.0 <sup>a</sup>	29.5±1.3 <sup>a</sup>	56.8±1.2 <sup>a</sup>	2.1±0.1 <sup>a</sup>	0.98±0.02 <sup>a</sup>	1.7±0.09 <sup>a</sup>	12.8±0.70 <sup>a</sup>	16.7±1.10 <sup>a</sup>
500	23.8±1.3 <sup>a</sup>	29.3±2.2 <sup>a</sup>	75.2±7.2 <sup>b</sup>	2.4±2.2 <sup>a</sup>	0.98±0.02 <sup>a</sup>	2.1±0.11 <sup>a</sup>	14.8±1.30 <sup>a</sup>	22.9±2.2 <sup>a</sup>
800	24.6±0.6 <sup>a</sup>	35.3±1.6 <sup>b</sup>	60.0±3.5 <sup>a</sup>	2.3±0.1 <sup>a</sup>	1.0±0.00 <sup>a</sup>	2.0±0.01 <sup>a</sup>	12.9±0.40 <sup>a</sup>	19.5±2.2 <sup>a</sup>

Conc., concentración; AF, Altura de follaje (cm); AP, altura de planta (cm); NT, número de tallos (adim); DM, diámetro de macollo (cm); GT, grosor de tallo (mm); AH, ancho de hoja (cm); LH, largo de hoja (cm); AFO, área foliar (cm<sup>2</sup>). Cifras con las mismas literales dentro de una misma columna son estadísticamente iguales ( $p < 0.05$ ).

en plantas de maíz en ambientes con enriquecimiento de CO<sub>2</sub> y bajo condiciones de estrés hídrico (Kimball, 2016; Ksiksi *et al.*, 2017; Mina *et al.*, 2018).

El Cuadro 1 muestra los resultados en cuanto al número de tallos. Se muestra como a concentraciones mayores que la ambiental, el número de tallos se incrementó ( $p < 0.05$ ). Investigaciones previas realizadas en *Agrostis stolonifera* reportaron que a concentraciones de 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  el número de brotes de crecimiento o estolones se incrementó (Xu *et al.*, 2018). Ese resultado es de alguna manera compatible con el encontrado en este estudio, ya que a esta misma concentración se incrementó el número de tallos con respecto al tratamiento control (concentración ambiental). Sin embargo, no es clara la causa de porque *Bouteloua gracilis* presentó mayor número de tallos a una concentración de 500  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ , comparada a la de 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . Por lo anterior, es necesario seguir adelante con este tipo de investigaciones para verificar la consistencia de este resultado y dilucidar sobre los mecanismos que provocan estas respuestas en *B. gracilis*.

Los descriptores fisiológicos evaluados para determinar el desempeño de *B. gracilis* en ambientes de concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> se muestra en el Cuadro 2. Se observa que la biomasa aérea y la biomasa radicular registraron valores mayores a concentraciones de 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ; sin embargo, estas diferencias no fueron significativas ( $p > 0.05$ ) y representan tan solo una tendencia. En este ambiente, las plantas pudieran estar secuestrando mayor cantidad de CO<sub>2</sub>, comparado con el control. Por tanto, se infiere que a concentraciones de CO<sub>2</sub> mayores a las evaluadas en este estudio, las plantas pudieran estar experimentando un mayor secuestro de carbono, como se reporta en anteriores

Cuadro 2 Descriptores fisiológicos sobre el desempeño de *Bouteloua gracilis* en ambientes con con concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en el aire

Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)	Biomasa Aérea (g planta <sup>-1</sup> )	Biomasa radicular (g)	ICC
380	1.4±0.1 <sup>a</sup>	1.7±0.2 <sup>a</sup>	1.1±0.03 <sup>a</sup>
500	1.3±0.2 <sup>a</sup>	1.3±0.1 <sup>a</sup>	1.2±0.10 <sup>a</sup>
800	1.7±0.2 <sup>a</sup>	1.8±0.2 <sup>a</sup>	1.1±0.04 <sup>a</sup>

Conc., concentración; ICC, índice de concentración de clorofila (adim). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna son estadísticamente iguales ( $p < 0.05$ ).

estudios (Kimball *et al.*, 2002). El resultado anterior se complementa con lo reportado en el Cuadro 1, específicamente por la variable altura de planta. Las plantas expuestas a mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> alcanzaron una altura mayor ( $p < 0.05$ ). Aunque, al no haber encontrado diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en la variable de rendimiento de forraje, esta altura probablemente se haya debido a una elongación celular únicamente; tal y como se reporta en la literatura (Driscoll *et al.*, 2006).

El secuestro de mayores cantidades de carbono a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en el aire es un hallazgo reportado en diversas investigaciones que estudiaron el comportamiento de plantas con ruta fotosintética C<sub>3</sub>. Sin embargo, los estudios con plantas C<sub>4</sub> son menores en número y el conocimiento es limitado en este tema (Reddy *et al.*, 2010). Esto resalta la necesidad de llevar a cabo más investigación en plantas C<sub>4</sub>, las cuales constituyen un componente importante de la productividad primaria de los ecosistemas terrestres (Ksiksi, 2016).

Aún así, en general las respuestas de *B. gracilis* no fueron significativas ( $p > 0.05$ ) al aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> probadas en este estudio. Esto pudiera deberse a que a concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosféricas, la bioquímica de la fotosíntesis de las plantas C<sub>4</sub> eleva la concentración de CO<sub>2</sub> en las vainas de las hojas a aproximadamente 2100  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  (Reddy *et al.*, 2010). A esas concentraciones, la reacción de la carboxilasa se ve saturada y no existe la fotorespiración (Von Caemmerer y Furbank, 2003). Por ello, se infiere que sería necesario aumentar los niveles de CO<sub>2</sub> a concentraciones mayores a las probadas en este estudio para experimentar efectos significativos. Aún así,

diversos estudios indican que las plantas C<sub>4</sub> responden a elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> a través de un mayor secuestro de este gas (Anderson *et al.*, 2003). En el caso del cultivo de la caña de azúcar, da Silva *et al.* (2008) reportó un aumento del 13 al 16 % en el rendimiento de la producción de este cultivo, al elevar el nivel del CO<sub>2</sub> en un 100 % con respecto a la concentración ambiental.

El índice de contenido de clorofila (ICC) fue estadísticamente similar ( $p>0.05$ ) en todas las concentraciones de CO<sub>2</sub> evaluadas (Cuadro 2). Estudios previos han reportado resultados similares para maíz (Ksiksi *et al.*, 2018). Wang *et al.* (2015) reportaron que el maíz, especie típica con ruta fotosintética C<sub>4</sub>, creciendo a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> (500-1000  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) no presentó diferencias significativas ( $p>0.05$ ) en la concentración de clorofila de sus hojas. Sin embargo, la concentración de clorofila si se redujo drásticamente a concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico altas, 3000 ó 5000  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ .

Para el caso de la variable de desarrollo de inflorescencia, no existió diferencia ( $p=0.2019$ ) entre los tratamientos. Por lo tanto, el número de plantas con desarrollo de inflorescencia al final del experimento fue estadísticamente similar ( $p=0.2019$ ) en los tres tratamientos. En cambio, la variable precocidad si mostró diferencias significativas ( $p=0.0052$ ). Las plantas expuestas a concentraciones de CO<sub>2</sub> de 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  registraron mayor precocidad de inflorescencia que las del resto de los tratamientos.

El gasto de agua que se registró en los tres ambientes con las tres concentraciones de CO<sub>2</sub> se muestra en la Figura 2. Se observa que con el avance del experimento, el consumo semanal de agua por planta aumentó. Esto es lógico

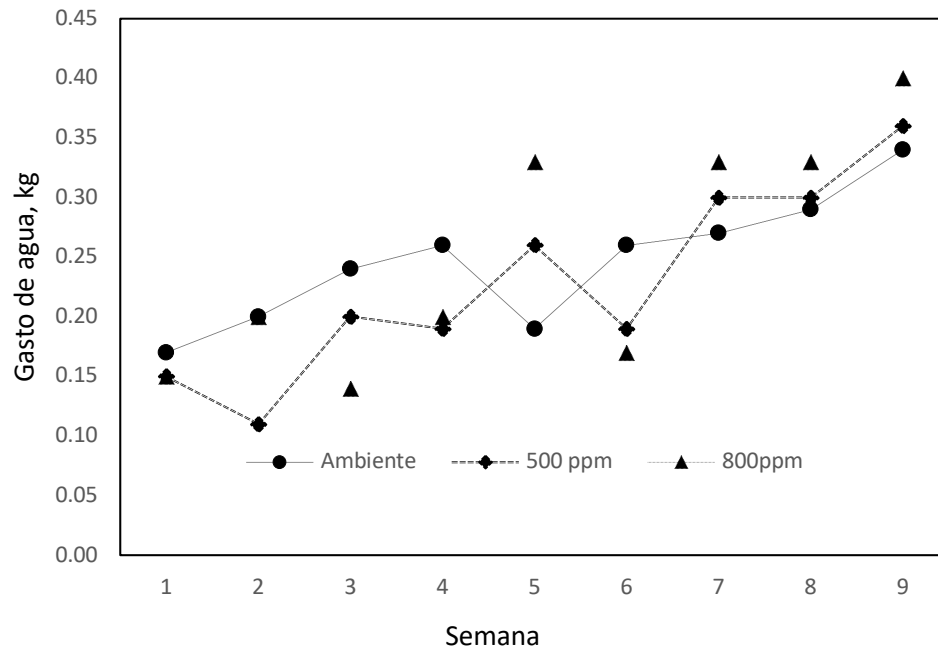


Figura 2. Gasto de agua semanal de *Bouteloua gracilis* en tres ambientes con diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire.

porque las plantas presentaron un crecimiento y desarrollo progresivo, lo cual les demandó cada vez mayor cantidad recursos, entre ellos el del agua. Se observa también como en general, los tratamientos tuvieron gastos de agua similares.

En el Cuadro 3 se muestran los resultados del análisis del gasto de agua de las plantas experimentales de *B. gracilis*. Aunque no se encontró un efecto general de los ambientes sobre el consumo de agua ( $p=0.2879$ ), el efecto varió de acuerdo a la semana del experimento por efecto de la interacción ambiente\*semana ( $p<0.001$ ). Por lo anterior, al analizar diferencias entre ambientes en determinadas semanas, mediante contrastes ortogonales se encontró que en la semana 2 el ambiente de  $500 \mu\text{mol mol}^{-1}$  tuvo un menor consumo de agua ( $p=.0136$ ) frente a los ambientes de  $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$  y nivel ambiental. Mientras tanto, en la semana 3 y 6 el ambiente de  $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$  tuvo un menor consumo ( $p=0.0002$  y  $p<0.0001$ ) que el control. En la semana 5 las diferencias fueron en un sentido contrario, el menor consumo se presentó para el nivel ambiental. Estos efectos significativos ( $p>0.05$ ) de interacción para el factor ambiente se pueden apreciar en la Figura 2. Sin embargo, se encontraron efectos significativos ( $p<0.05$ ) tanto para el factor semana como para la interacción de factores de semana por ambiente. Esto se debe a que las condiciones ambientales de una semana a otra de manera natural cambian y éstas influyen directamente sobre el gasto de agua o transpiración de las plantas.

Estudios previos han demostrado que el gasto de agua o transpiración de las plantas  $C_4$  se reduce a altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  (Wilson *et al.*, 1999). En altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  la conductancia estomatál se modifica y provoca un mayor secuestro de  $\text{CO}_2$ , sin un mayor consumo de agua (Reich *et al.*, 2018).



Cuadro 3. Resultado del análisis de gasto de agua de *Bouteloua gracilis* en ambientes con concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en el aire

Efecto	DF	DF	F	PR>F
Ambiente	2	21	1.32	0.2893
Semana	8	167	15.64	<.0001
Semana*ambiente	16	167	6.58	<.0001
500 μmol mol <sup>-1</sup> vs ambiente y 800 μmol mol <sup>-1</sup> en semana 2	1	168	6.22	0.0136
Ambiente vs 800 μmol mol <sup>-1</sup> en semana 3	1	168	14.94	0.0002
Ambiente vs 800 μmol mol <sup>-1</sup> en semana 5	1	168	25.95	<0.0001
Ambiente vs 800ppm en semana 6	1	168	20.25	<0.0001

DF, grados de libertad; F, f de Esnedecor; PR= probabilidad.

Con ello, la eficiencia en el uso del agua de plantas C<sub>4</sub> aumenta en condiciones de altas concentraciones.

Los resultados encontrados en este estudio indican que los niveles de CO<sub>2</sub> utilizados no ejercieron efecto significativo ( $p > 0.05$ ) en el consumo de agua de éstas, lo cual se contrapone a resultados reportados en algunos estudios llevados a cabo anteriormente (Wilson *et al.*, 1999; Reich *et al.*, 2018). En contraste, existen estudios que indican que especies de plantas C<sub>4</sub>, como el maíz y el sorgo, no presentan sensibilidad a concentraciones de CO<sub>2</sub> mayores a las ambientales (Kimball, 2016). Más aun, algunos autores reportan que los resultados de investigaciones sobre las respuestas de plantas C<sub>4</sub> a altas concentraciones de CO<sub>2</sub> presentan contradicciones (Reddy *et al.*, 2010). Sin embargo, este es el primer estudio de este tipo con esta especie.

Por lo anteriormente expuesto, se considera importante seguir con futuras investigaciones sobre las respuestas de especies C<sub>4</sub> en ambientes con concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>, especialmente con especies de importancia ecológica y económica. Tal es el caso de algunas especies de pastos y algunos cultivos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub>, en niveles de 500 y 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  en la atmosfera, presentó efectos significativos en algunos descriptores morfológicos como el número de tallos, altura de planta y precocidad con respecto al desarrollo de la inflorescencia de *Bouteloua gracilis*. Adicionalmente, no se encontró un efecto general de los ambientes sobre el consumo de agua; sin embargo, el efecto varió de acuerdo a la semana del experimento por efecto de la interacción ambiente\*semana. Para futuras investigaciones se recomienda aumentar los niveles de CO<sub>2</sub> a concentraciones mayores a las probadas en este estudio para determinar si se presentan cambios significativos.

## LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 1a ed. Editorial organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. Italia.
- Alonso E. , B. E .Dell., W . C. Clark., H. E. Daly, J. Hemming, D. H. Meadows, F. D. Pineda, V. W. Ruttan y E. U. Von Weizsacker. 1996. Ecología y desarrollo: escalas y problemas de la dialéctica, desarrollo-medio ambiente. 1ª ed. Editorial complutense. Madrid España.
- Anderson, M. D. 2003. *Bouteloua gracilis*. In: Fire Effects Information System. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (Producer). En: <http://www.fs.fed.us/database/feis/> 2015. Consultado 4 Noviembre 2015.
- Báez-González, A. D., G. Reyez-López, A. Melgoza-Castillo , M. Royo-Márquez y R. Carrillo-Romo. 1999. Características productivas del sistema vaca-cría del estado de Chihuahua. Rev. Mex. Cienc. Pecu. 37(2):11-24.
- Beltrán, S., C. García, J. Hernández, C. Loreda., J. Urrutia, I. Gonzales y H. Gamez. 2010. "Navajita Cecilia" *Bouteloua gracilis* H.B.K (Lag.). Nueva variedad de pasto para zonas áridas y semiáridas. Rev. Mex. Cienc. Pecu.1:127-130.
- Caballero M., S. Lozano y B. Ortega. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde el centro de la tierra. Revista digital universitaria UNAM. 8:2-12.
- Callejas-Juárez, N., H. Aranda-Gutierrez, S. Rebollar-Rebollar y M. De la Fuente-Martinez. 2014. Situación económica de la producción de bovinos de carne en el estado de Chihuahua. Agronomía Mesoamericana. 25:133-139.
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro. 1a ed. Editorial CONABIO, Instituto de Ecología, UNAM y Agrupa-Sierra Madre S.C. México.
- da Silva F.C., C.G.H. Diaz-Ambrona, M.S. Buckeridge, A. Souza, B. Barbierie y D. Dourado-Neto. 2008. Sugarcane and climate change: Effects of CO<sub>2</sub> on potential growth and development. Acta Hort. 802:331-336.
- Driscoll, S. P., A. Prins, E. Olmos, K. J. Kunert y C. H. Foyer. 2006. Specification of adaxial and abaxial stomata, epidermal structure and photosynthesis to CO<sub>2</sub> enrichment in maize leaves. J. Exp. Bot. 57:381-390.
- Droogers, P. y J. Aerts. 2005. Adaptation strategies to climate change and climate variability: A comparative study between seven contrasting Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 30:339-346.

- Fischer, E. M. y R. Knutti. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*. 5: 563.
- García, M. E. y J. V. Villa. 1977. Factores ambientales que afectan la distribución geográfica de *Bouteloua gracilis* (H. B. K.) LAG. En el estado de San Luis Potosí. *Agrociencia*. 28:3-29.
- Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato y K. Lo. 2010: Global surface temperature change. *Rev. Geophys.* 48:1-29.
- Huertas, L. 2008. El control ambiental en invernaderos: humedad relativa. *Industria Hortícola*. 205:52-54.
- INEGI. 2007. Ganado bovino en Chihuahua, México. INEGI. México.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jaramillo, V. 1986. La importancia de los coeficientes de agostadero y de las gramíneas en el manejo de los agostaderos del país. Páginas 8-15 en *Memorias del II Congreso Nacional sobre Manejo de Pastizales*. C J Gutierrez. Saltillo, Coah. México.
- Jurado-Guerra, P., M. Luna-Luna, R. Barretero-Hernández, M. Royo Márquez y A. Melgoza-Castillo. 2006. Producción y calidad de forraje y semilla del zacate navajita con la aplicación de biosólidos en un pastizal semiárido de Jalisco. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 3:289-300.
- Kimball, B. A., K. Kobayashi y M. Bindi. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Advances in Agronomy*. 77:293-368.
- Kimball, B. A. 2016. Crop response to elevated CO<sub>2</sub> and interactions with H<sub>2</sub>O, N, and temperature. *Current Opinion in Plant Biology*. 31:36-43.
- Ksiksi, T. S. 2016. Carbon dioxide enrichment studies: current knowledge and trends in plant responses. *Afr. J. Agric. Res.* 11:1027-1032.
- Ksiksi, T. S., S. B. Thruppoyil y R. Palakkott. 2017. Elevated CO<sub>2</sub> improves vegetative growth of water-stressed *Zea mays* L. under low photosynthetic photon flux density. *Res. J. Bot.* 12:53-62.
- Ksiksi, T. S., S. B. T. Ppoyil y A. R. Palakkott. 2018. CO<sub>2</sub> enrichment affects eco-physiological growth of maize and alfalfa under different water stress regimes in the UAE. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 24:251-259.
- Madrid, L., Q. Rascón, C. Morales, V. Nevárez y S. Arévalo. 2009. Polimorfismo genético del pasto navajita (*Bouteloua gracilis* (Wild. Ex ex Kunth) lag. Ex

- Steud) en el estado de Chihuahua, México. En memorias del XIII congreso de biotecnología y bioingeniería. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.
- Martínez J. y A. Fernández. 2004. Cambio climático : una visión desde México. 1a ed. SEMARNAT, Mexico DF.
- Martínez, P. y A. Aguilar. 2009. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. 2a ed. Editorial SEMARNAT. México.
- Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas-Carbo y J. Gulias,. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. Investigaciones geográficas. 43:63-84.
- Mina, U., R. Kumar, R. Gogoi, A. Bhatia, R. C. Harit, D. Singh, A. Kumar y A. Kumar. 2018. Effect of elevated temperature and carbon dioxide on maize genotypes health inde. Ecological Indicators. (In press).
- Molden, D. 2007. Water for food water for life: A comprehensive Assessment of water management in agriculture. Earhscan and Colombo: International water Management Institute. Londres, Inglaterra.
- Morales, N. C. R. y A. Melgoza. 2010. Características productivas de zacates forrajeros importantes en el norte de México. Folleto Técnico No. 28. S.E. La Campana-Madera. INIFAP-SAGARPA: 1- 46.
- Moreno-Gomez, B., E. Garcia-Moya, Q. Rascón-Cruz y G. A. Aguado-Santacruz. 2012. Crecimiento y establecimiento de plántulas de *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths y *Eragrostis curvula* var. *conferta* Stapf bajo un régimen simulado de lluvia. Revista fitotecnia mexicana. 4:299-308.
- Ottman, M. J., B. A. Kimball, P. J. Pinter, G. W. Wall, R. L. Vanderlip, S. W. Leavitt. R. L. LaMorte, A. D. Matthias y T. J. Brooks. 2001. Elevated CO<sub>2</sub> increases sorghum biomass under drought conditions. New Phytologist. 150:261-273.
- Perez, A. 2009. Estudio agronómico y fisiológico del albaricoquero en condiciones de infradotación hídrica. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.
- Ping, M. A., B. A. I. Tuan-hui y M. A. Feng-Wang. 2015. Effects of progressive drought on photosynthesis and partitioning of absorbed light in apple trees. J. Integr. Agr. 14(4):681-690.
- Reddy, A. R., G. K. Rasineni y A. S. Raghavendra. 2010. The impact of global elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and plant productivity. Current Science. 99:46-57.

- Reich, P. B., S. E. Hobbie, T. D. Lee y M. A. Pastore. 2018. Unexpected reversal of C<sub>3</sub> versus C<sub>4</sub> grass response to elevated CO<sub>2</sub> during a 20-year field experiment. *Science* 360: 317-320.
- Sague R. F. y D. S. Kubien. 2003. Quo vadis C<sub>4</sub>? An ecophysiological perspective on global change and the C<sub>4</sub> plants. *Photosynth. Res.* 77:209-225.
- Sague R. F., T. L. Sague y F. Kocacinar. 2012. Photorespiration and the evolution of C<sub>4</sub> photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology.* 63:19-47.
- Sanchez, M. I. 2001. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Rev. Geogr. Norte Gd.* 28: 310.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. *Fisiología vegetal*. 3a ed. Editorial Universitat Jaume I. California, E.U.A.
- USDA. 2005. La Transpiración - Movimiento del Agua a Través de las Plantas. En:<https://passel.unl.edu/pages/informationmodule.php?idinformationmodule=1123617035> Consultado 27 Abril 2016.
- Villarreal-Guerrero, F., M. Kacira, E. Fitz-Rodríguez, C. Kubota, G. A. Giacomelli, R. Linker y A. Arbel. 2012. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high-pressure fogging. *Scientia Horticulturae.* 134:210-22.
- Von Caemmerer, S. y R. T. Furbank. 2003. The C<sub>4</sub> pathway: an efficient CO<sub>2</sub> pump. *Photosynth. Res.* 77:191-207.
- Wang, M., B. Xie, Y. Fu, C. Dong, L. Hui, L. Guanhui y H. Liu. 2015. Effects of different elevated CO<sub>2</sub> concentrations on chlorophyll contents, gas exchange, water use efficiency, and PSII activity on C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> cereal crops in a closed artificial ecosystem. *Photosynth. Res.* Doi: 10.1007/s11120-015-0134-9.
- Wilson K. B., T. N. Carlson y J. A. Bunce. 1999. Feedback significantly influences the simulated effect of CO<sub>2</sub> on seasonal evapotranspiration from two agricultural species. *Global Change Biology.* 5:903-917.
- Wipff, J. K. 2003. *Bouteloua, Flora of North America*. Oxford University Press. New York. New York.
- Wu, H., S. Tang, X. Zhang, J. Guo, Z. Song, S. Tiang y D. Smith. 2009. Using elevated CO<sub>2</sub> to increase the biomass of a *Shorghum vulgare* x *Sorghum vulgare* var. *sudanense* hybrid and *Trifolium pratense* L. and to trigger hyperaccumulation of cesium. *Journal of Hazardous Materials.* 170:861-870.
- White, P. R., S. Murray y M. Rohweder. 2000. *Pilot Analysis of Global Ecosystems-Grassland ecosystems*. World Research Institute. Washington, D.C. E.U.A.

Xu, Q., F. Ningly., Z. Lily., Y. Jingjin y H. Bingru. 2018. Enhanced estolon growth and metabolic adjustment in creeping bentgrass with elevated CO<sub>2</sub> concentration. *Environmental and experimental botany*. 195:85-97.