



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD SALTILLO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SUSTENTABILIDAD DE LOS  
RECURSOS NATURALES Y ENERGÍA**

**Determinación de almacenes de carbono en suelos de áreas verdes urbanas en  
zonas áridas**

**Tesis que presenta**

Gabriela Guillen Cruz

**Para obtener el grado de**

Maestro en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía

Directores de Tesis: Dra. Dulce Yaahid Flores Rentería  
Dr. Fabián Fernández Luqueño

Saltillo, Coahuila

Agosto 2018

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a Dios por guiarme en el camino en todo momento.

Agradezco infinitamente a mis directores de tesis, a la Dra. Dulce Y. Flores Rentería por siempre ser paciente, por compartir sus conocimientos y creer en mí. También agradezco al Dr. Fabián Fernández Luqueño por ser tan dedicado y por su disponibilidad para enseñarme.

A mi familia que a pesar de la distancia siempre he contado con su apoyo. A mi novio por su alor, ánimos, apoyo incondicional y por creer en mí. A mi mejor amiga Araceli por su infinito apoyo y ayuda en todo este trayecto. Sin duda, sin ellos esto no hubiera sido posible.

A mis compañeros de generación quienes se convirtieron en parte de mi familia y de quienes siempre recibí apoyo y sabiduría. En especial quiero agradecer a Ana Laura Rodríguez por ser mi cómplice, apoyo y compañera de tesis y a Andrés Torres por su apoyo, ayuda en todo este camino, sin él no hubiera sido posible.

A CINVESTAV Saltillo y personal por brindarme las facilidades para realizar este trabajo.

A CONACYT por la beca otorgada para el desarrollo de la tesis de maestría.

## CONTENIDO

---

RESUMEN.....	I
ABSTRAC.....	II
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
2.1. Cambio climático .....	3
2.2. Dinámica del carbono orgánico en los suelos .....	3
2.3. Factores que controlan el flujo del carbono en el suelo .....	5
2.3.1. Bióticos.....	5
2.3.2. Abióticos.....	6
2.3.3. Antropogénicos .....	6
2.4. Dinámica del carbono en zonas áridas .....	7
2.5. Áreas verdes como almacenes de carbono en el suelo.....	9
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. OBJETIVOS .....	13
5. METODOLOGÍA .....	14
5.1. Metodología para el Parque Industrial Ramos Arizpe .....	14
5.1.1. Área de estudio.....	14
5.1.2. Determinación de características fisicoquímicas del suelo.....	17
5.1.3. Análisis de datos.....	19
5.2. Metodología para el invernadero .....	20
5.2.1. Área de estudio.....	20
5.2.2. Sequía prolongada .....	21
5.2.3. Determinación de características fisicoquímicas del suelo.....	22
5.2.4. Análisis de datos.....	23
6. RESULTADOS.....	23
6.1. Potencial de almacén de carbono en el Parque Industrial Ramos Arizpe .....	23
6.1.1. Efecto del tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe en la respiración del suelo y los factores que la controlan .....	23
6.1.2. Relación entre variables en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe	29
6.1.3. Almacenamiento de carbono en el suelo de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.....	32
6.2. Potencial de almacén de carbono en condiciones controladas .....	33

6.2.1. Efecto de la sequía controlada y el tipo de vegetación en los mesocosmos en la respiración del suelo y los factores que la controlan .....	33
6.2.2. Relaciones entre variables de los mesocosmos bajo condiciones controladas .....	34
5. DISCUSIÓN .....	38
6. CONCLUSIONES .....	41
7. BIBLIOGRAFÍA.....	42

## LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Descripción de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. ....	16
<b>Tabla 2.</b> Diseño experimental para la determinación del potencial de almacén de carbono en condiciones controladas.....	20
<b>Tabla 3.</b> Fechas y porcentajes de reducción de humedad para los mesocosmos sometidos a sequía.....	22
<b>Tabla 4.</b> Características fisicoquímicas del suelo asociadas al tipo de vegetación (nativa y exótica) en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. ....	28
<b>Tabla 5.</b> Correlación de Pearson entre las propiedades fisicoquímicas del suelo de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. * $p < 0.05$ ; ** $p < 0.001$ ; *** $p < 0.0001$ . ....	32
<b>Tabla 6.</b> Características fisicoquímicas del suelo asociadas al tipo de vegetación (nativa y exótica) en los mesocosmos del invernadero sometidos a presequía o sequía. ....	35
<b>Tabla 7.</b> Correlación de Pearson entre las propiedades fisicoquímicas del suelo de los mesocosmos en el invernadero (** $p < 0.0001$ ). ....	38

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Flujo de carbono en el suelo.....	4
<b>Figura 2.</b> Distribución de zonas áridas en el mundo [9]. .....	7
<b>Figura 3.</b> Ubicación geográfica de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. ....	15
<b>Figura 4.</b> Trampa de NaOH.....	17
<b>Figura 5.</b> Superficie de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. ....	19
<b>Figura 6.</b> Distribución de la vegetación en los mesocosmos.....	21
<b>Figura 7.</b> Respiración del suelo asociada al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media $\pm$ error estándar ( $n=3$ ). Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre empresas para un determinado tipo de vegetación y las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía. ....	24
<b>Figura 8.</b> Materia orgánica del suelo asociada al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media $\pm$ error estándar ( $n=3$ ). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía. ....	25
<b>Figura 9.</b> Carbono orgánico del suelo asociado al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media $\pm$ error estándar ( $n=3$ ). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía. ....	26
<b>Figura 10.</b> Humedad del suelo asociada al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media $\pm$ error estándar ( $n=3$ ). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía. ....	27
<b>Figura 11.</b> Correlación de Pearson entre la $R_s$ y el porcentaje de MOS en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.....	29
<b>Figura 12.</b> Correlación de Pearson entre la $R_s$ y el porcentaje de COS en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.....	30
<b>Figura 13.</b> Correlación de Pearson entre la $R_s$ y el porcentaje de humedad del suelo en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. ....	31
<b>Figura 14.</b> Correlación de Pearson entre el porcentaje de MOS y el porcentaje de humedad del suelo en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. ....	31
<b>Figura 15.</b> Respuesta a la respiración del suelo en distintos tipos de vegetación (nativa y exótica). El control (sin vegetación) está representado con el color verde (trama 1), las cactáceas y cactáceas con arbusto (vegetación nativa) están representadas por el color azul (trama 2 y 3,	

respectivamente) y el pasto (vegetación exótica) por el color anaranjado (trama 4). Los valores son la media  $\pm$  error estándar (n=3). Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre mesocosmos y las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre sequías, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía. ....33

**Figura 16.** Regresión lineal entre la  $R_s$  y el porcentaje de MOS en los diferentes tipos de vegetación sometidos a sequía. Se presentan los valores de R y P de una regresión lineal.....36

**Figura 17.** Regresión lineal entre la  $R_s$  y el porcentaje de humedad del suelo en los diferentes tipos de vegetación sometidos a sequía. Se presentan los valores de R y P de una regresión lineal. ....37

**Figura 18.** Correlación entre el porcentaje de humedad del suelo y el porcentaje de MOS en los diferentes tipos de vegetación sometidos a sequía. ....37

## ABREVIATURAS

---

<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CIS</b>	Carbono inorgánico del suelo
<b>COS</b>	Carbono orgánico del suelo
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CT</b>	Carbono total
<b>ET</b>	Evapotranspiración anual media
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>GT</b>	Giga toneladas
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico
<b>MOS</b>	Materia orgánica del suelo
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Óxido nitroso
<b>NT</b>	Nitrógeno total
<b>P</b>	Precipitación
<b>R<sub>s</sub></b>	Respiración del suelo
<b>TAP</b>	Temperatura ambiental promedio



## RESUMEN

El suelo de las áreas verdes urbanas en zonas áridas funciona potencialmente como almacén natural de carbono de manera que puede contribuir a mitigar el cambio climático. Con el objetivo de conocer el potencial de almacén de carbono en el suelo y su flujo de salida conforme el tipo de vegetación en áreas verdes, se determinaron el carbono orgánico (COS) y la respiración del suelo ( $R_S$ ) mediante la instalación de trampas de NaOH y, otras características fisicoquímicas en dos aproximaciones (en campo y en invernadero). El estudio de campo se realizó en cuatro áreas verdes con vegetación nativa y cuatro áreas verdes con vegetación exótica de empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe. También se estimaron valores de  $R_S$  y COS para el área total del Parque Industrial. La  $R_S$  y el COS fueron significativamente mayores en áreas verdes con vegetación exótica en comparación con la vegetación nativa. La tasa de  $R_S$  y la concentración de COS para las áreas verdes con vegetación nativa del Parque Industrial fueron menores ( $0.0003 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y  $4.05 \text{ kg m}^{-2}$ , respectivamente) en comparación con las áreas verdes con vegetación exótica ( $0.0006 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y  $15.60 \text{ kg m}^{-2}$ , respectivamente). Estos resultados sugieren que utilizar vegetación nativa en las áreas verdes de zonas áridas tiene el potencial de liberar una menor cantidad de carbono a la atmósfera y almacenarlo en el suelo durante más tiempo, en comparación con la vegetación exótica.

La segunda aproximación se realizó en el invernadero, en donde se establecieron mesocosmos con pasto (vegetación exótica), cactáceas y cactáceas- arbusto (vegetación nativa), los cuales se sometieron a un periodo de sequía (disponibilidad hídrica completa) y sequía. La  $R_S$  fue significativamente más alta en el pasto en ambos periodos con un promedio de  $0.0004 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en comparación al resto de la vegetación con un promedio de  $0.0002 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . Durante el periodo de sequía los valores de  $R_S$  disminuyeron tanto para pastos como para la vegetación nativa. Sin embargo, la apariencia estética de la vegetación nativa durante la sequía siguió siendo saludable. En cambio, el pasto se secó completamente. Estos resultados demuestran que el uso de vegetación nativa libera una menor cantidad de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera aún en periodos de sequía en comparación al uso de pasto, el cual además tiene una alta dependencia al riego.

## ABSTRAC

Soils of urban green gardens in arid areas potentially works as a natural carbon store, contributing to mitigate the climate change. To know the potential of soil carbon storage and its output flow according to vegetation type in urban green areas, soil organic carbon (SOC) and soil respiration ( $R_s$ ) were determined by installing NaOH traps and other soil physicochemical characteristics at two approximations (field and greenhouse). Field approximation was carried out in four green areas with native vegetation and four urban green areas with exotic vegetation of companies of the Parque Industrial Ramos Arizpe.  $R_s$  and SOC values were also estimated for the total area of the Industrial Park.  $R_s$  and SOC were significantly higher in green areas with exotic vegetation compared to native vegetation. The rate of  $R_s$  and the concentration of SOC for the total green areas of the Industrial Park with native vegetation were lower ( $0.0003 \text{ kg of C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  and  $4.05 \text{ kg m}^{-2}$ , respectively) compared to the total green areas with exotic vegetation ( $0.0006 \text{ kg of C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  and  $15.60 \text{ kg m}^{-2}$ , respectively). These results suggest that using native vegetation in the green areas of arid zones has the potential to release a smaller amount of carbon into the atmosphere and stored it for longer time, compared to the soils with exotic vegetation.

The second part was made in the greenhouse, where were established mesocosms with grass (exotic vegetation), cacti and cacti-shrub (native vegetation), that were submitted to maintenance to full hydric conditions and then to a drought period. The  $R_s$  was significantly higher in the grass in both periods with an average of  $0.0004 \text{ kg of C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  compared to the rest of the vegetation (native) with an average of  $0.0002 \text{ kg of C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . During the drought period,  $R_s$  values decreased for both grass and native vegetation. However, the aesthetic appearance of native vegetation during the drought continued to be healthy. Instead, the grass dried up completely. These results show that the use of native vegetation releases a lower amount of  $\text{CO}_2$  to the atmosphere even in periods of drought compared to the use of grass, which also has a high dependence on irrigation to survive.

## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la temperatura en el planeta durante el último siglo se ha relacionado con el cambio climático asociado a un origen antropogénico, principalmente causado por el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, de estos el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el principal contribuyente [1]. De acuerdo a los modelos de predicción global se prevé que los efectos derivados del calentamiento global tendrán un impacto negativo para los ecosistemas naturales, los sistemas productivos y la vida futura de la humanidad [2]. Derivado de lo anterior, existe un gran interés para disminuir las concentraciones de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, a través de varias estrategias como el mantenimiento y promoción de almacenes naturales de carbono.

El suelo representa la principal reserva de carbono del planeta con 1460 Giga toneladas (GT), siendo casi tres veces la cantidad almacenada por la atmósfera (800 GT) [3]. Por esta razón, los suelos representan uno de los mayores flujos de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, esto de manera natural, mediante la respiración del suelo ( $R_s$ ).

El almacenamiento de carbono en el suelo depende del equilibrio entre las entradas y las pérdidas de carbono. Existen múltiples factores bióticos, abióticos o antropogénicos que influyen en los procesos de almacenamiento de carbono en el suelo. Los principales factores bióticos son la composición de la vegetación y la actividad microbiana, los factores abióticos son el clima (precipitación y temperatura) y las características del suelo (materia orgánica, humedad y pH) y, los principales factores antropogénicos son el uso y manejo del suelo [4, 5]. El cambio de uso de suelo, cambio en la cobertura vegetal y el manejo inadecuado del suelo, entre otros, son factores que favorecen la emisión de  $\text{CO}_2$  del suelo a la atmósfera [6, 7].

Los ecosistemas de zonas áridas representan el 10.6% de la superficie terrestre y aproximadamente el 30% de las poblaciones humanas viven en zonas áridas y semiáridas en constante expansión [5, 8]. Sus suelos se caracterizan por su escasa agua, bajos contenidos de materia orgánica (0.5 al 1%) y deficiencia de nutrientes [9]. Sin embargo, las zonas áridas tienen el potencial de almacenar carbono a largo plazo, debido a que son menos propensas a perder carbono comparado con los suelos húmedos,

debido a que la falta de agua limita la mineralización de la materia orgánica del suelo resultando en la reducción del flujo de carbono a la atmósfera [9, 10].

A pesar de la importancia que tienen los suelos en el ciclo biogeoquímico del carbono, la mayoría de los estudios están enfocados en ecosistemas agrícolas y naturales, prestando poca atención en los almacenes de carbono en el suelo de las áreas verdes urbanas [11], las cuales están formadas por el suelo y la vegetación, donde el suelo funciona como apoyo y proporciona nutrientes a las plantas, mientras que las plantas, mediante su biomasa aérea y de las raíces, regresan el carbono al suelo [1]. El tipo de vegetación es uno de los factores que determina el grado de secuestro de carbono en el suelo, por lo que una de las estrategias de manejo del suelo incluye la selección de especies apropiadas para cada región [12], ya que cada especie difiere en su capacidad para capturar, almacenar y liberar carbono [13].

Las especies exóticas (principalmente pastos) son comúnmente utilizadas en las áreas verdes urbanas con el objetivo de mejorar la estética y por desconocer las consecuencias que conlleva utilizarlas, siendo una de ellas la alteración del ciclo de carbono [14]. En contraste, cuando se utilizan especies nativas para diseñar el paisaje, se requiere un menor mantenimiento, las plantas soportan climas extremos de la región y se promueve la biodiversidad regional [15]. A pesar de que el uso de plantas nativas tiene beneficios sociales y ambientales, su uso en las áreas verdes urbanas sigue siendo limitado.

En particular, se sabe poco sobre el potencial que tienen las especies exóticas (sistemas de pasto) y nativas (cactáceas, arbustos, etc.) para favorecer el almacenamiento de carbono en el suelo de áreas verdes situadas en zonas áridas. Por consiguiente, el objetivo de esta tesis es cuantificar el potencial de almacenamiento de carbono en áreas verdes urbanas, a través de la determinación de la respiración del suelo en sistemas con plantas nativas y exóticas. Esta información es importante para determinar la combinación de plantas que promuevan el almacenamiento de carbono reduciendo las pérdidas del mismo en el suelo.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Cambio climático**

El cambio climático en la Tierra es una realidad desde hace al menos un millón de años, pasando de periodos fríos a calientes de manera natural. A partir de la Revolución Industrial el cambio climático también es atribuido a causas antropogénicas como la combustión de combustibles fósiles, la industria, la ganadería, la agricultura, entre otros. Estas actividades humanas coinciden en la emisión de GEI a la atmósfera, siendo los principales el CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) [1]. En donde el CO<sub>2</sub> contribuye en mayor medida al cambio climático con 76%, teniendo como consecuencias el incremento en las temperaturas, aumento en el nivel del mar, sequias, inundaciones, entre otras [16].

Existe un gran interés por reducir la concentración de los GEI en la atmósfera, principalmente del CO<sub>2</sub>, lo que ha producido un gran número de estudios. Algunos de ellos enfocados en tecnologías de energías renovables [17, 18] o tecnologías de captura y almacenamiento [16]. Sin embargo, también existen estudios de captura y almacenamiento de carbono en ecosistemas naturales por parte de la vegetación [19, 20] y el suelo [21, 22].

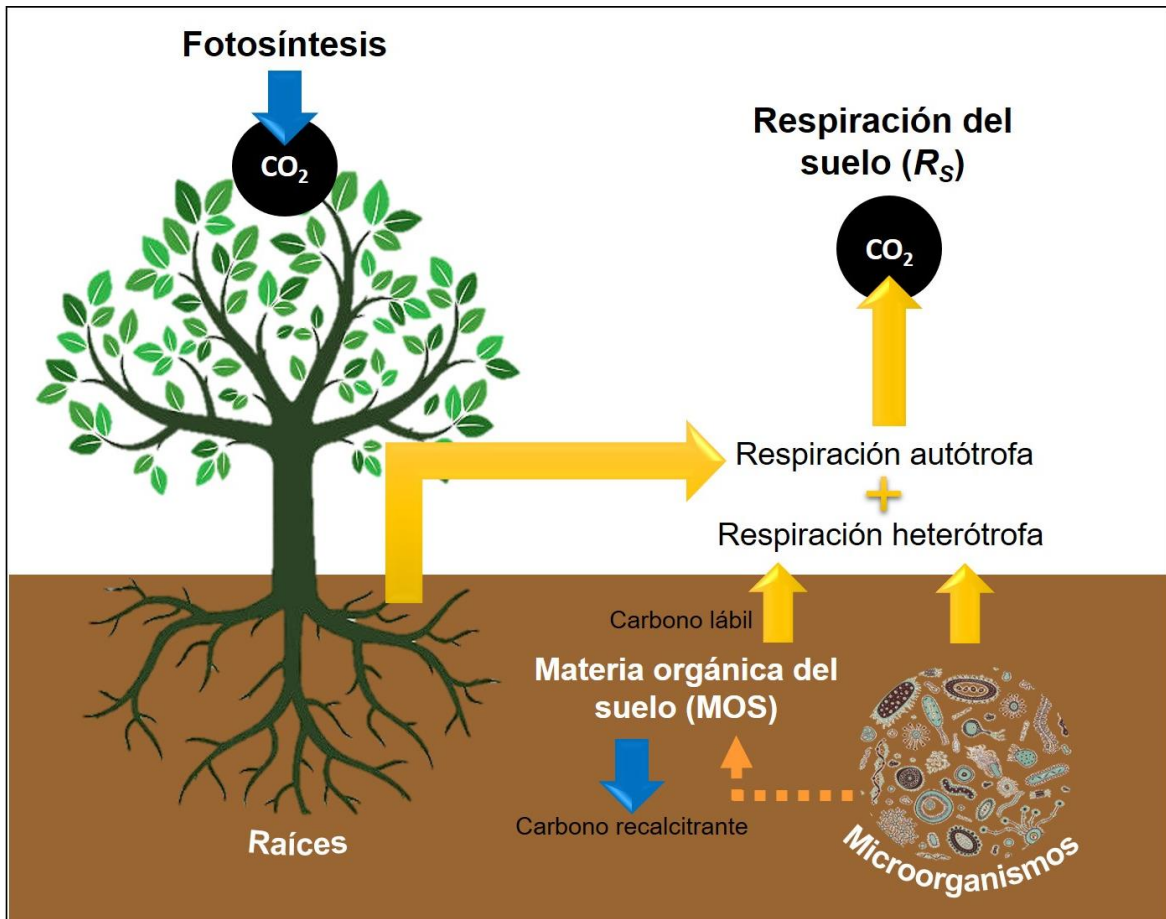
### **2.2. Dinámica del carbono orgánico en los suelos**

El suelo es la base de los ecosistemas terrestres sustentando la mayor parte de sus servicios [23] como la producción de alimentos, ciclo de nutrientes y almacén de carbono [23, 24].

El suelo es el mayor almacén de carbono orgánico terrestre con un aproximado de 1460 GT, almacenando más carbono que la vegetación (560 GT) y la atmosfera (800 GT) [11, 25-27]. Por otro lado, la emisión de carbono (respiración del suelo) por parte del suelo es diez veces mayor que el CO<sub>2</sub> que proviene de la quema de combustibles fósiles [1, 11].

El flujo de carbono entre la atmósfera y el suelo empieza mediante el proceso de fotosíntesis en donde el CO<sub>2</sub> se fija desde la atmósfera a través de la planta en sus tejidos (hojas, tallo, raíces), una vez que estos se descomponen pasan a formar parte de la materia orgánica del suelo (MOS); una fracción de carbono (lábil) almacenado en la MOS

es liberada en un periodo de tiempo corto a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  al ser descompuesta por los microorganismos (respiración heterótrofa) y la otra fracción de carbono (recalcitrante) es almacenado por largos periodos de tiempo. El carbono en el suelo también puede ser liberado a la atmósfera como  $\text{CO}_2$  mediante la respiración de la raíz de la planta, también llamada respiración autótrofa (Figura 1) [10, 21, 28].



**Figura 1.** Flujo de carbono en el suelo.

El almacenamiento de carbono en el suelo depende del equilibrio entre los insumos de la producción primaria y las pérdidas de carbono a la atmósfera mediante la  $R_s$  [29, 30].

El carbono orgánico del suelo (COS) es de gran interés porque tiene el potencial de actuar como fuente o sumidero de carbono. Por lo tanto, se han realizado numerosos estudios para evaluar el COS, las existencias totales de carbono y la  $R_s$  en ecosistemas naturales [1, 11, 31].

En un ecosistema mediterráneo Albaladejo et al. [30] relacionaron las concentraciones de COS en suelo con diferentes usos (bosque, suelos de cultivo y matorrales), a distintas

profundidades. Ellos reportaron que la mayor concentración de COS se encuentra a una profundidad de entre 0 y 40 cm. En los bosques la concentración de carbono orgánico fue significativamente más altas que en los suelos de cultivo y matorral. Además, ellos también encontraron que la precipitación es el factor que explica la mayor variabilidad de respiración del suelo en los bosques, a diferencia de los suelos de cultivo y matorrales, en donde la temperatura media fue el principal factor que explica la variabilidad de carbono orgánico del suelo [30].

### **2.3. Factores que controlan el flujo del carbono en el suelo**

Existen factores bióticos, abióticos y antropogénicos que influyen en el almacén de carbono orgánico en el suelo, y por lo tanto la respiración del mismo [30]. Los factores bióticos son la MOS, el tipo de vegetación, la producción de biomasa y biomasa microbiana [32]. La temperatura y el contenido de humedad en el suelo son los principales factores abióticos que influyen en la respiración del suelo [11, 32]. Sin embargo, la respiración del suelo también es controlada por otros factores abióticos son el clima (precipitación y temperatura), el tipo de suelo y sus propiedades fisicoquímicas. El uso y manejo de suelo son los factores antropogénicos que influyen en la estabilización del carbono en el suelo [30].

#### **2.3.1. Bióticos**

La MOS contiene aproximadamente 58% de carbono orgánico [33] y es un indicador de la calidad del suelo debido a que reduce la erosión, retiene la humedad y, aumenta la fertilidad y la biodiversidad [34]. Está documentado en diferentes tipos de ecosistemas naturales que la adición de MOS aumenta la respiración el suelo debido a que estimula la actividad microbiana, así como también, estimula el crecimiento de las raíces aumentando la respiración autótrofa [35-37]. Así mismo, la MOS ayuda a retener el agua en los espacios entre los poros del suelo [38].

La capacidad de un suelo para capturar, almacenar y liberar carbono puede variar de acuerdo al tipo de vegetación según la región climática [13]. Además, existen diferencias en la producción de biomasa, la cantidad de hojarasca y la distribución de las raíces según el tipo de vegetación, lo que determina la disponibilidad de nutrientes para la

misma planta y la comunidad microbiana estableciendo la cantidad de carbono que se almacena en el suelo y la respiración del mismo [39, 40].

El tipo de vegetación en una región varía de acuerdo con las condiciones climáticas y el tipo de suelo. La fotosíntesis es un proceso que realizan las plantas y esta difiere según las características de las condiciones ambientales en donde se encuentren, de acuerdo con las vías metabólicas de los organismos fotosintéticos se dividen en  $C_3$ ,  $C_4$  y CAM [41]. La forma más común de fotosíntesis es la  $C_3$  (la mayoría se los pastos) y se caracterizan por tener sus estomas abiertos en el día. La vía  $C_4$  (algunas plantas del desierto) recibe el nombre ya que el primer producto de la fotosíntesis son azúcares con cuatro moléculas de carbono, son comunes de climas cálidos y se utiliza en cerca del 3% de todas las plantas vasculares. Las plantas como las cactáceas utilizan la vía del metabolismo CAM, las cuales abren sus estomas para el intercambio de gases durante la noche; la ventaja de esta vía es que sus estomas permanecen cerrados durante el día, lo que reduce significativamente la transpiración. Sin embargo, las plantas CAM crecen con más lentitud en comparación con las plantas  $C_3$  [42].

### **2.3.2. Abióticos**

La temperatura, la humedad del suelo y el clima (precipitación y temperatura) son los principales factores abióticos que controlan la  $R_s$  y el carbono orgánico [28, 43, 44]. El crecimiento de las plantas y la actividad microbiana requieren un rango específico de humedad en el suelo. A medida en que la humedad del suelo disminuye los microorganismos se reprimen, limitando su actividad y por lo tanto la  $R_s$  [38, 45, 46].

Jia Mi y colaboradores examinaron el efecto de humedad en la mineralización del COS en diversos sitios áridos y semiáridos, con incubaciones del suelo en el laboratorio. En todos los sitios estudiados la humedad controló la  $R_s$  [32].

La precipitación es un factor que cambia con el tiempo, en la temporada de lluvia el contenido de humedad en el suelo ocasiona grandes variaciones de  $R_s$ , principalmente en zonas áridas en donde al tener un suelo seco, una pequeña cantidad de agua resulta en grandes emisiones de  $R_s$  [47].

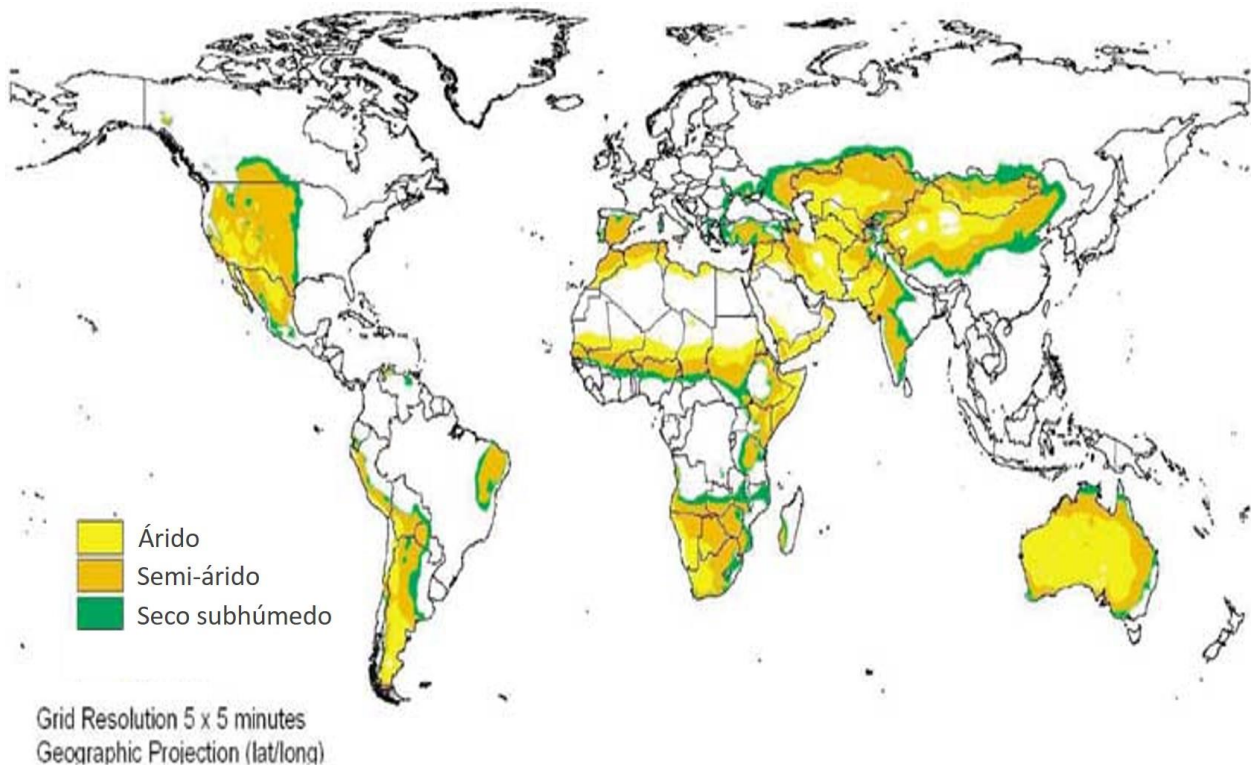
### **2.3.3. Antropogénicos**



A escala global el cambio en el uso del suelo aporta 25% de CO<sub>2</sub> antropogénico a la atmósfera. El uso y manejo del suelo son las principales actividades antropogénicas que afectan a la superficie terrestre. La agricultura, la deforestación y la urbanización son algunas de las actividades que afectan los flujos de carbono en el suelo [27, 48].

#### 2.4. Dinámica del carbono en zonas áridas

Los ecosistemas desérticos, que cubren aproximadamente el 47.2% de la superficie terrestre (Figura 2), de los cuales las zonas áridas contribuyen con el 20%, pueden proporcionar importantes servicios al ecosistema, incluyendo el secuestro de carbono [27, 35, 40]. En México aproximadamente el 65% del ecosistema es desértico [49] y la mayor parte del territorio Coahuilense está incluida en el Desierto Chihuahuense, cuya comunidad más característica es el matorral desértico [49]. Estos ecosistemas son los más propensos a experimentar periodos de sequía [50].



**Figura 2.** Distribución de zonas áridas en el mundo [9].

Las regiones desérticas pueden ser clasificadas de acuerdo con los grados de aridez. La UNESCO creó un índice de aridez, resultado de la relación de la precipitación anual media (P) y la evapotranspiración anual media (ET), es decir, P/ET. De acuerdo con este

índice, los desiertos se pueden agrupar en tres clases: zonas de hiper aridez ( $P/ET < 0.03$ ), zonas áridas ( $P/ET = 0.03-0.2$ ) y zonas semiáridas ( $P/ET = 0.2-0.5$ ) [42, 51].

El total de carbono almacenado en el desierto es de 743 GT y Norte América aporta el 31% de esta reserva [10]. Los suelos de los desiertos se caracterizan por su escasa agua, bajos contenidos de materia orgánica (0.5 al 1%) y deficiencia de nutrientes. Sin embargo, cualquiera que sea su estado, proporcionan el medio para que las plantas crezcan. La vegetación que es capaz de soportar estos suelos va desde *Larrea tridentata*, *Agave lechuguilla*, *Yucca filifera*, *Ancistrocactus brevihamatus*, etc., las cuales habitan en desiertos áridos o con poca vegetación y en pastizales, matorrales, sabana y bosques secos [9, 52]. La vegetación que caracteriza a los paisajes de las zonas áridas de México es la familia *Cactaceae*, albergando la mayor cantidad de especies con más de 550 [42, 53].

Las plantas en el desierto desarrollaron estrategias de adaptación para aprovechar el agua de manera eficaz. Las características que pueden estar presentes en una especie determinada son las siguientes: 1) el desarrollo de estructuras de almacenamiento de agua, 2) una gruesa cutícula cerosa, 3) la reducción del número de estomas por unidad de área, 4) la reducción del tamaño o la supresión de las hojas, 5) el desarrollo de una red compleja de raíces superficiales para aumentar el poder de absorción de agua y 6) el desarrollo de mecanismos fotosintéticos que reducen la pérdida de agua por la transpiración [42].

Montaño y colaboradores analizaron la información disponible sobre almacenes y flujos de la dinámica del carbón en las regiones áridas y semiáridas de México [5]. De acuerdo con ese análisis, el almacén de carbono orgánico en los suelos de matorrales áridos y semiáridos varía de 2.1 a 72 mg C ha<sup>-1</sup>. En estos ecosistemas la respiración del suelo, producción y descomposición de materia orgánica están determinados por la precipitación, radiación solar y la temperatura, volviéndose más vulnerables ante los cambios de vegetación. Adicionalmente la transformación del paisaje de zonas no urbanas modifica drásticamente los almacenes y el flujo de carbono, incrementando, de forma general, la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, dependiendo del tipo de vegetación [8], debido a que esta controla las condiciones micro ambientales que regulan la descomposición de la materia orgánica y la liberación del CO<sub>2</sub> a la atmósfera [54, 55].

En otro estudio, en una región de matorral desértico al noreste de China, se examinaron las relaciones entre las variables respiración del suelo, carbono de la biomasa microbiana y humedad del suelo. Los resultados obtenidos reflejaron una correlación positiva de la humedad del suelo con el carbono en la biomasa microbiana y la respiración del suelo. Además, determinaron la influencia de la vegetación en las características del suelo y su contribución a la formación de materia orgánica en el suelo al suministrar fuentes de carbono mediante los exudados de raíz y hojarasca. También reportaron que la humedad del suelo y la biomasa microbiana fue más alta cerca de los matorrales, producto de la sombra que generan [56].

## **2.5. Áreas verdes como almacenes de carbono en el suelo**

Más del 50% de la población mundial viven en zonas urbanas y la tendencia es que aumente a 70% en el año 2050 [31, 57]. Las zonas desérticas albergan a más del 38% de la población mundial [58] y en México alrededor del 30% de sus habitantes viven en zonas desérticas [49]. El desarrollo urbano en tales zonas aumenta la demanda de áreas verdes dentro de las ciudades y zonas urbanas [15].

A diferencia de los ecosistemas naturales, las áreas verdes de las zonas urbanas son diseñadas, construidas, plantadas y mantenidas de manera intensiva por el ser humano [59] y representa del 3 al 5% de la superficie terrestre mundial [60], con un alto potencial para almacenar carbono en sus suelos. Las áreas verdes urbanas en un principio fueron creadas por estética. Sin embargo, proporcionan diversos servicios sociales como recreación y conciencia ambiental [15, 61]; desde el punto de vista ecológico actúan como reductoras de emisiones de GEI y como almacenes de carbono en el suelo [23].

Las áreas verdes urbanas tienen diferentes tipos de vegetación como arbustos, pasto y plantas leñosas [4]. Sin embargo, de acuerdo a su origen, la vegetación puede ser llamada nativa o exótica. Las áreas verdes normalmente se componen de vegetación exótica en los Estados Unidos y otros países [15]; estas especies son muy dependientes al riego y mantenimiento [61] como es el caso del pasto en zonas áridas [62]. En la mayoría de los casos, el mantenimiento de áreas verdes, con especies exóticas poco adaptadas a las condiciones locales, genera mayores problemas y costos que sobrepasan los beneficios que estas proporcionan. Un ejemplo de esto son los paisajes

cubiertos de pasto que son sub-utilizados, es decir, los pastos sembrados en los camellones de las carreteras y las grandes extensiones que destinan las empresas a este tipo de vegetación, las cuales no tienen un uso recreativo para la población y su mantenimiento representa una inversión económica pública y privada [63].

El uso de vegetación nativa conlleva beneficios como menor mantenimiento, se encuentran adaptadas a los extremos climáticos de la región y promueven la biodiversidad regional [15].

A nivel mundial son pocos los estudios que se han realizado para determinar el contenido de carbono en zonas urbanas con diversos tipos de vegetación. Un ejemplo de dichos estudios es el elaborado por Jill y colaboradores en 2013 quienes analizaron el efecto de la cobertura del suelo con herbáceas (césped, huertas y pastizales) y arbustos sobre las concentraciones de COS de espacios verdes domésticos y no domésticos, en Leicester de Reino Unido, la cual tiene clima templado [31]. Sus resultados muestran que las concentraciones de COS se vieron afectadas por el tipo de cobertura vegetal, en donde los suelos bajo los árboles y arbustos tenían mayores concentraciones de materia orgánica en el suelo ( $75.2 \text{ mg g}^{-1}$ ) en cambio el tipo de cobertura herbácea de los jardines no domésticos presentaron las concentraciones menores ( $45.5 \text{ mg g}^{-1}$ ) [31].

En otro estudio, en un parque urbano en Seúl, República de Corea, se analizaron las concentraciones de carbono orgánico en el suelo a diferentes profundidades, en distintos tipos de cobertura vegetal (humedales, pasto, bosque y mixto), reportando que las concentraciones más altas de COS ( $13.99 \text{ kg m}^{-2}$  para humedales, seguido de bosques y pastos) en el suelo se encontraron en los primeros 10 cm de profundidad en todos los tipos de cobertura vegetal [4]. Sin embargo, los suelos cubiertos con pastos presentaron una mayor reducción en el COS en comparación con el resto de los tipos de cobertura vegetal [4].

De manera similar, una investigación realizada en Nueva Zelanda, sobre la variabilidad de las reservas de carbono orgánico y la respiración del suelo a diferentes profundidades, para áreas verdes urbanas con diferentes tipos de cobertura vegetal (césped y bosque urbano) [11], destacó que la concentración de carbono orgánico fue significativamente mayor en los primeros 10 cm para suelos de áreas verdes con césped ( $4.8 \text{ kg m}^{-2}$ ), en

comparación con los bosques urbanos ( $2.7 \text{ kg m}^{-2}$ ). En los que respecta a la respiración del suelo, los resultados mostraron el flujo más alto ( $7.56 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) en áreas verdes con césped con una mayor frecuencia de riego, en donde la humedad fue superior a la de otros sitios (30% versus 13-22%) [11].

Aún más escasos son los estudios de ecología urbana en zonas áridas. Uno de los pocos estudios encontrados es el realizado por Koten y colaboradores en California, Estados Unidos, en el que los pastos exóticos han desplazado a los pastos nativos en todo el estado [14]. Al realizar un estudio de la concentración de COS, las mayores concentraciones se encontraron en los pastos nativos. En otro estudio en la Ciudad de Phoenix, AZ, las áreas con plantas nativas (p. ej. propias de desierto, y por tanto con una alta eficiencia en el uso del agua) almacenan más carbono y presentan una tasa de liberación de  $\text{CO}_2$  diez veces menor que en otras áreas verdes donde plantas no nativas están más representadas, como por ejemplo jardines dominados por especies ornamentales exóticas, pastos en campos de golf o plantaciones domésticas de alfalfa y algodón [8].

### 3. JUSTIFICACIÓN

Ante el inminente incremento de la temperatura asociada al cambio climático, los almacenes de carbono naturales surgen como estrategias de mitigación al representar una reducción del CO<sub>2</sub> en la atmósfera (principal gas de efecto invernadero). El suelo como principal almacén de carbono, debe ser aprovechado como tal, esta estrategia se ha venido implementando en los ecosistemas naturales del mundo. Sin embargo, son pocos los estudios que se han enfocado en la capacidad de almacenamiento de carbono que tienen los ecosistemas áridos.

Los ecosistemas áridos cubren aproximadamente el 10.6% de la superficie terrestre y albergan a más del 30% de la población mundial quienes la mayoría viven en zonas urbanas. Una de las principales demandas en las urbanizaciones es la existencia de áreas verdes públicas, las cuales brindan diversos servicios al ecosistema.

Las áreas verdes urbanas al representar del 3-5% de la superficie terrestre y se convierten en sistemas clave para proveer el servicio de almacenamiento de carbono en el suelo. Sin embargo, para que las áreas verdes aprovechen su potencial, es necesario evaluar los flujos de carbono entre el suelo y la atmósfera. Lo anterior a través de la estimación de la tasa de respiración del suelo y del carbono orgánico del suelo, en áreas verdes con vegetación nativa de las zonas áridas y con vegetación exótica, así como evaluar los factores que controlan el almacén de carbono en el suelo.

Este trabajo propone brindar las herramientas científicas necesarias a los tomadores de decisiones (públicos y privados), para optar por un diseño de áreas verdes con el tipo de vegetación que más pueda contribuir al almacenamiento de carbono en el suelo.

## **4. OBJETIVOS**

### **General**

Determinar el tipo de vegetación que promueva el almacenamiento de carbono en el suelo de áreas verdes urbanas de zonas áridas.

### **Específicos**

- Cuantificar y comparar la tasa de respiración del suelo con diferentes tipos de vegetación (plantas nativas vs exóticas) en áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.
- Estimar el área destinada a área verde -sembrada con pastos vs plantas nativas de la región- del Parque Industrial Ramos Arizpe para establecer los puntos de muestreo y estimar la cantidad potencial de carbono que podría ser almacenado en suelo, dependiendo del tipo de vegetación.
- Determinar las propiedades físicas y químicas de suelos de áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.
- Establecer mesocosmos en el invernadero con suelos colectados en un área urbana de Ramos Arizpe (Parque Industrial Ramos Arizpe) y establecer diferentes tipos de vegetación nativas de la región (cactáceas y arbustos) y exótica (pastos), para comparar las tasas de respiración del suelo y cuantificar su potencial como almacenes de carbono bajo condiciones controladas.
- Determinar el efecto de la sequía en las tasas de respiración de mesocosmos con diferentes tipos de vegetación nativas y exóticas.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Metodología para el Parque Industrial Ramos Arizpe

#### 5.1.1. Área de estudio

La investigación se realizó en el municipio de Ramos Arizpe, ubicado al sureste del estado de Coahuila, con una extensión territorial de 5306.6 km<sup>2</sup>, ubicado entre las coordenadas 100°57 '2" longitud oeste y 25°32 '26" latitud norte, con una altitud sobre el nivel del mar de 1380 m. Con base en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el clima de Ramos Arizpe es seco semicálido y de acuerdo con la clasificación de la UNESCO es árido [42]; presenta una temperatura media anual de 14 a 18°C y una precipitación anual de 300 a 400 mm.

El 45.3% del suelo se puede clasificar como litosol, que se caracteriza por su profundidad menor a 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido [64]. El tipo de vegetación predominante es matorral, en donde su cobertura está dominada por cactáceas (p. ej.: *Opuntia sp*; *Echinocereus*; *Echinocactus*), suculentas (p. ej. *Agave lechuguilla*), y arbustivas (p. ej. *Dasyllirion sp* y *Larrea tridentata*, entre otros).

El Parque Industrial Ramos Arizpe, cuenta con una extensión aproximada de 4.8 km<sup>2</sup> y 83 empresas e instituciones, siete de las cuales participan en el presente estudio. Cuatro de dichas empresas cuentan con áreas verdes con vegetación nativa (Zf Sachs Automotive México -ZF-, Cinvestav -CVN-, Arysta Lifescience -ARS-, e Inductotherm -IND-) y cuatro con áreas verdes con vegetación exótica (Universidad Tecnológica de Coahuila -UTC-, Cinvestav -CVE-, Yanfeng Automotive Interiors -YF-, e Internacional de Aceros Térmicos -PAT-) (Figura 3).





**Figura 3.** Ubicación geográfica de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

Las áreas verdes con vegetación nativa del presente estudio se caracterizan por la presencia de diversas especies de cactáceas (e.g. *Mammillaria sp.*, *Opuntia sp.*), agaves (e.g. *Agave lechuguilla*), arbustivas (e.g. *Leucophyllum frutescens*) y arbóreas (e.g. *Prosopis glandulosa*), propias de las regiones áridas y semiáridas de México. Por el contrario, las áreas verdes con vegetación exótica presentan una cobertura de pastos exóticos (e.g. pasto bermuda -*Cynodon dactylon*-). Asimismo, se realizaron encuestas a los encargados de las áreas verdes con el fin de conocer el historial de manejo de las mismas (Tabla 1).

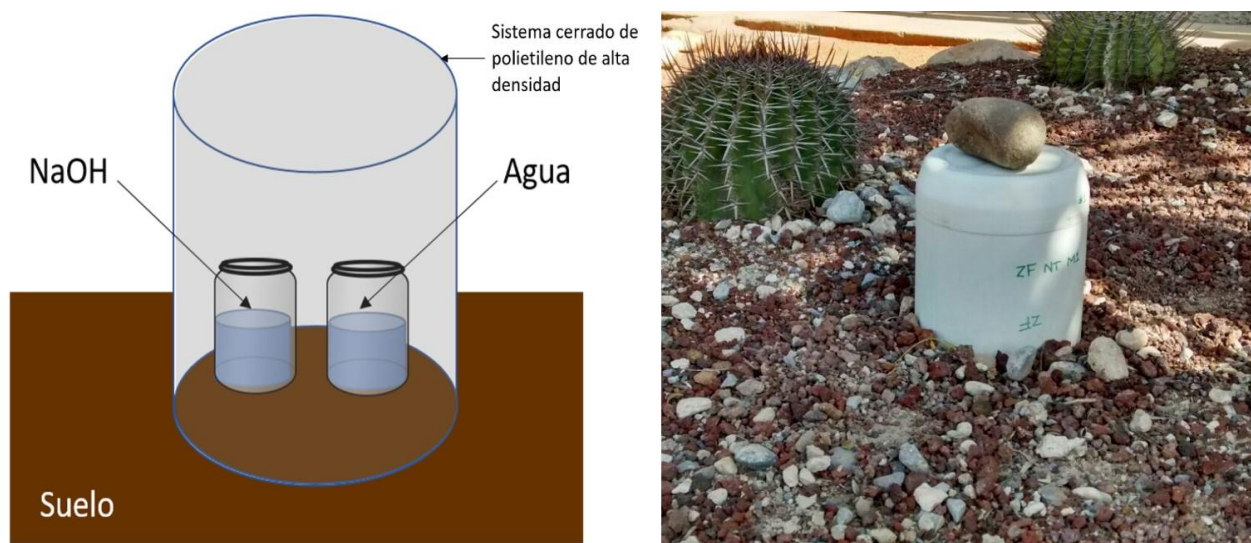
**Tabla 1.** Descripción de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

Empresa	Cubierta vegetal		Descripción	Mantenimiento	Uso	Edad (años)	Coordenadas
	Tipo	Área total (m <sup>2</sup> )					
<b>Cinvestav Unidad Saltillo</b>	Nativa	97	2.45	Cactáceas, palmas y arbustos como cenizos	Retiro de hierba y basura	Ninguno	3-5 25°33'49.07"N 100°56'19.16"O
	Exótica	481		Pasto, palmas, pinos y arbustos	Poda y riego	Ninguno	
<b>Universidad Tecnológica de Coahuila</b>	Exótica	113 122	17.60	Pasto en su mayoría y arboles	Poda y riego	Ninguno	15-20 25°33'24.83"N 100°56'10.54"O
<b>Arysta Lifescience</b>	Nativa	60 446	6.95	Cactáceas, maguey, lechuguillas y palmas	Poda y retiro de hierba	Jardín botánico	15 25°33'30.09"N 100°55'28.89"O
<b>Zf Sachs Automotive México</b>	Nativa	77 682	4.26	Cactáceas, palmas, arbustos como cenizos y mezquites	Limpieza, reacomodo, monitoreo de plagas	Jardín botánico	16 25°33'28.48"N 100°55'48.23"O
<b>Yanfeng Automotive Interiors</b>	Exótica	32 307	1.64	Pasto, arbustos y palmas	Riego, retiro de hierba, poda y limpieza	Ninguno	8 25°33'29.07"N 100°56'4.59"O
<b>PAT</b>	Exótica	3 445	5.34	Pasto y palmas	Poda	Ninguno	20 25°33'35.01"N 100°55'29.65"O
<b>Inductotherm</b>	Nativa	4 328	19.96	Cactáceas, palmas y arbustos	Ninguno	Ninguno	- 25°33'34.62"N 100°55'35.71"O

### 5.1.2. Determinación de características fisicoquímicas del suelo

En cada área verde se establecieron tres puntos de muestreo en los que se determinó la  $R_S$  y posteriormente se colectaron 500 gr de suelo en los primeros 10 cm de profundidad (24 puntos, ocho sitios con vegetación exótica o nativa x tres puntos de muestro por sitio). Las muestras de suelo se tamizaron con malla de 2 mm en el laboratorio para las determinaciones futuras.

La  $R_S$  fue determinada en el mes de octubre del 2017, con una temperatura ambiental promedio de 28°C, y sin precipitaciones durante el tiempo de muestreo. En cada punto de muestreo se utilizaron trampas de hidróxido de sodio (NaOH), con un área de 169 cm<sup>2</sup>. En cada trampa se colocó un frasco con 20 ml de NaOH (0.5 M) y un frasco con 20 ml de agua destilada para mantener la humedad relativa dentro de la misma (Figura 4). Las trampas se dejaron en incubación durante 72 horas y posteriormente en el laboratorio se determinó la cantidad de CO<sub>2</sub> liberado por el suelo mediante titulación con ácido clorhídrico (HCl 0.5 M), utilizando como indicador la fenolftaleína.



**Figura 4.** Trampa de NaOH

La cantidad de carbono liberado por el suelo en forma de CO<sub>2</sub> es obtenida a partir de la diferencia entre el resultado de un ensayo en blanco y el resultado de la solución de NaOH incubada, utilizando la siguiente ecuación:

$$R_S (\text{mg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = \frac{(V_b - V_m) \times M \times 6}{A \times t}$$

Donde:

$R_S$  = C- CO<sub>2</sub> en un tiempo determinado (mg de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);

$V_b$  (ml) = Volumen de ácido clorhídrico gastado en la titulación del blanco;

$V_m$  (ml) = Volumen de ácido clorhídrico gastado en la titulación de la muestra;

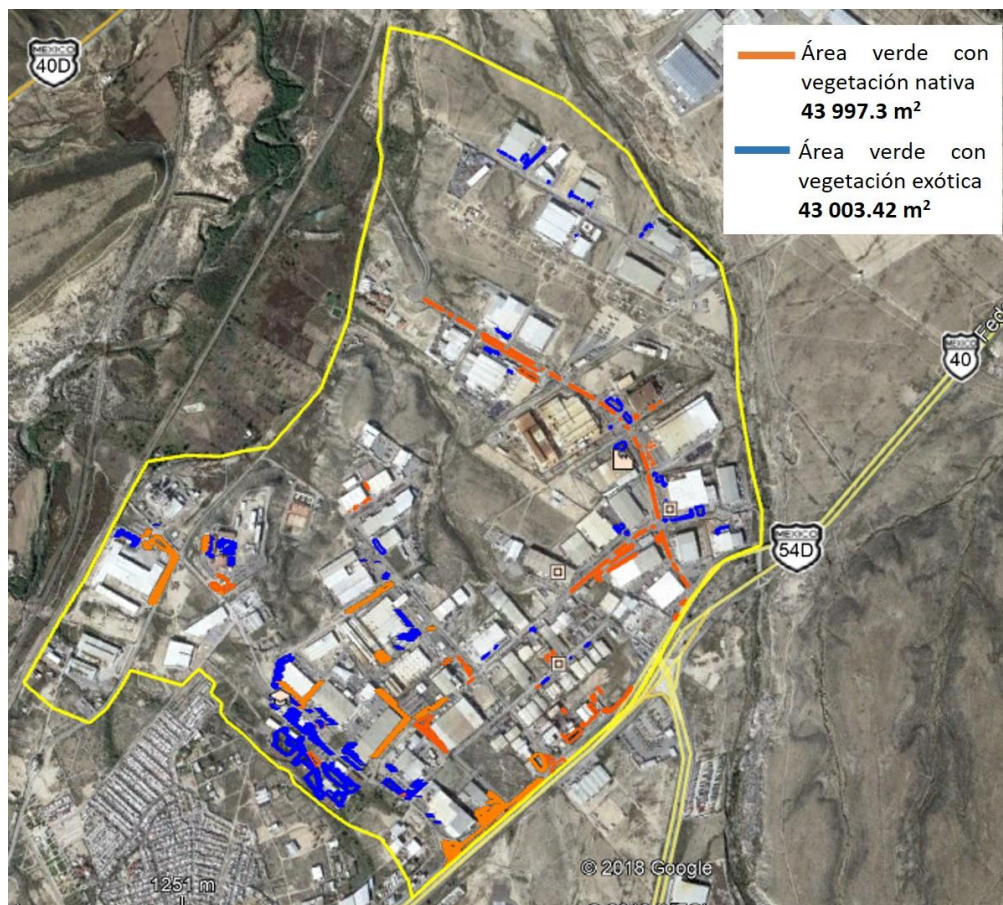
$M$  = Molaridad del HCl;

6 = Se refiere al peso equivalente del carbono dividido entre la razón estequiométrica de la reacción para formar Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> donde una mol de CO<sub>2</sub> reacciona con dos moles de NaOH.

Se determinó el COS con el método de Walkley-Black [65]. Adicionalmente, en el laboratorio de análisis químicos del CINVESTAV Unidad Saltillo, se determinó la cantidad de carbono inorgánico (CIS) y nitrógeno total (NT) del suelo por los métodos de combustión con detección por absorción infrarroja y conductividad térmica, respectivamente [66]. MOS se determinó por el método de calcinación a 400°C durante cuatro horas [66]. La humedad del suelo fue determinada por pérdida de peso secando las muestras al horno a 105°C, durante 48 horas [66]. El pH fue medido en suspensión suelo:agua relación 1:2.5, la misma solución fue utilizada para medir la conductividad eléctrica del suelo [67]. La densidad aparente se determinó a partir del método descrito por [67].

La superficie ocupada por áreas verdes con vegetación nativa y vegetación exótica similar a la de las empresas estudiadas, se estimó a través de Google Earth (Figura 5).





**Figura 5.** Superficie de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

### 5.1.3. Análisis de datos

Las reservas de carbono orgánico del suelo ( $\text{kg m}^{-2}$ ) se calcularon considerando la cantidad de carbono orgánico, la densidad aparente y la profundidad de la capa superior del suelo.

Los valores obtenidos de  $R_s$ , COS, CIS y carbono total del suelo (CT) fueron extrapolados a la superficie total de las áreas verdes según su tipo de vegetación de las empresas involucradas en el estudio y posteriormente a la superficie total de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

Se determinaron las diferencias entre los factores “tipo de vegetación” (nativas vs exóticas) y dentro de cada tipo de vegetación la influencia de cada “empresa”, mediante Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía ( $P < 0.05$ ). Para determinar diferencias significativas entre las medias se utilizó la prueba de honestidad de Tukey’s. También, se realizaron análisis de correlación de Pearson’s entre la  $R_s$  y las variables bióticas y

abióticas. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software STATISTICA V10.0.

## 5.2. Metodología para el invernadero

### 5.2.1. Área de estudio

El invernadero se encuentra ubicado en las instalaciones de CINVESTAV Unidad Saltillo dentro del Parque industrial Ramos Arizpe, en el estado de Coahuila de Zaragoza en donde se establecieron 11 mesocosmos construidos de tarimas de madera de pino con dimensiones promedio de 69 cm de largo × 58 cm de ancho × 6 cm de profundidad, forradas con polietileno transparente. Para el establecimiento de dichos mesocosmos se colocó suelo, el cual se muestreó en el mes de mayo de 2017 en las inmediaciones del CINVESTAV.

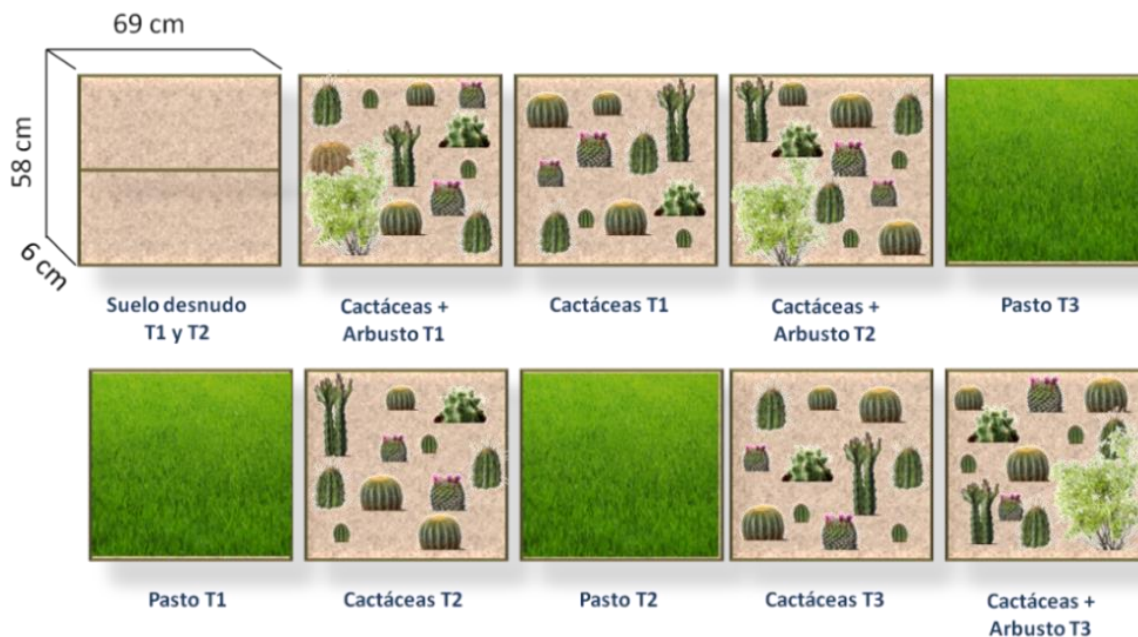
En un diseño factorial se establecieron tres tipos de mesocosmos, con tres o dos réplicas de cada uno (Tabla 2). Mesocosmos 1: suelos sin vegetación (control). Mesocosmos 2: pasto (15 g de semillas) de *Cynodon dactylon* (pasto bermuda). Mesocosmos 3: cactáceas (11 individuos) con cobertura de tezontle. Mesocosmos 4: cactáceas (11 individuos) y arbusto (1 individuo) con cobertura de tezontle (Figura 6). A los mesocosmos con vegetación nativa se les agrego tepetate para simular las condiciones a las que se encuentran las áreas verdes con este tipo de vegetación.

**Tabla 2.** Diseño experimental para la determinación del potencial de almacén de carbono en condiciones controladas

Tipo de Mesocosmos	Tratamiento	Número de réplicas
1	Suelo desnudo	2
2	Pasto	3
3	Cactáceas	3
4	Cactáceas + arbusto	3

Las plantas seleccionadas para los mesocosmos fueron de tamaños similares entre cada una de las réplicas y tratamientos y se sembraron en Julio de 2017. Las cactáceas utilizadas fueron suministradas por el Dr. Alfredo Flores, del CINVESTAV Unidad Saltillo. Los arbustos utilizados *Leucophyllum frutescens* (comúnmente conocido como cenizo), son nativos del norte de México y el sudoeste de Estados Unidos y se adquirieron en el

vivero La Palma de la Ciudad de Saltillo. Asimismo, se empleó semilla de pasto *Cynodon dactylon* que es el que comúnmente se utiliza en las áreas verdes de la región, por su alta resistencia a la sequía en comparación con otras especies de pasto. Dichos mesocosmos se colocaron de manera contigua pero aleatoria dentro del invernadero (Figura 6).



**Figura 6.** Distribución de la vegetación en los mesocosmos.

### 5.2.2. Sequía prolongada

Los mesocosmos de pastos se regaron diariamente de mayo a octubre de 2017 y una vez a la semana de noviembre de 2017 hasta antes del periodo de sequía prolongada en mayo del 2018, mientras que los mesocosmos con cactáceas y arbustos se regaron según sus necesidades hídricas. En todos los casos, los mesocosmos se regaron con agua de la región.

Después de 12 meses del establecimiento de los mesocosmos para garantizar la estabilidad de las condiciones en los mismos, se aplicó una simulación de sequía prolongada de dos tiempos, reduciendo la humedad del suelo de manera paulatina (Tabla 3). Cabe señalar que en las fechas señaladas en la Tabla 3 marcan la puesta y retiro de la trampa de NaOH; 15 días antes de dichas fechas se estabilizó la humedad del suelo al valor requerido para cada periodo.

En el periodo de presequía los valores de humedad seleccionados están basados en la capacidad de campo del suelo utilizado en los mesocosmos, la cual fue de 50 KPa. Las cactáceas tienen bajos requerimientos de agua e incluso sobreviven largos periodos de tiempo sin ella [68]. Sin embargo, para los pastos se recomienda regar a saturación cada 48 horas en un suelo con un mayor contenido de calcio, debido a que la humedad se evapora de manera rápida [69, 70].

En el periodo de presequía la temperatura dentro del invernadero en promedio fue de 31°C y para el periodo de sequía de 38°C.

**Tabla 3.** Fechas y porcentajes de reducción de humedad para los mesocosmos sometidos a sequía.

<b>Tiempos de sequía</b>	<b>Fechas (2018)</b>	<b>Mesocosmos</b>	<b>Humedad del suelo (KPa)</b>
Presequía	Del 9 al 11 de mayo	Suelo	50
		Pasto	55
		Cactáceas	141
		Cactáceas- arbusto	101
Sequía	Del 28 al 30 de mayo	Suelo	86
		Pasto	98
		Cactáceas	185
		Cactáceas- arbusto	149

### **5.2.3. Determinación de características fisicoquímicas del suelo**

Al inicio del experimento en invernadero, se midió el tamaño de los individuos sembrados y se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del suelo y respiración con base en las metodologías descritas previamente en la sección 5.1.2.

Durante el periodo de sequía se determinó la respiración del suelo, por el método de trampas de hidróxido de sodio (NaOH). Además, se monitoreo de la humedad del suelo durante la instalación de las trampas de NaOH y al retiro de las mismas, por pérdida de peso secando las muestras al horno a 105°C, durante 72 horas. Adicionalmente, se monitoreo la humedad del suelo con 4 sensores (un sensor para cada tipo de mesocosmos) 1400 Data Logger (Spectrum Technologies, Inc), con mediciones cada 15



minutos. Dichos sensores miden la tensión hídrica del suelo (kPa), valores menores de tensión significan una mayor humedad del suelo y valores más altos de tensión una menor humedad.

Adicionalmente, se determinó la cantidad de materia orgánica del suelo, la cantidad de carbono orgánico, la cantidad de nitrógeno y carbono total del suelo, pH y conductividad al inicio y al final del experimento, por los métodos descritos en la sección anterior.

#### **5.2.4. Análisis de datos**

Se determinaron las diferencias entre los periodos (presequía vs sequía) y los tipos de vegetación de cada mesocosmos, mediante Análisis de Varianza (ANOVA) ( $P < 0.05$ ). Para determinar diferencias significativas entre las medias se utilizó la prueba de honestidad de Tukey. También, se realizaron análisis de correlación de Pearson entre la  $R_s$  y las variables bióticas y abióticas. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software STATISTICA V10.0.

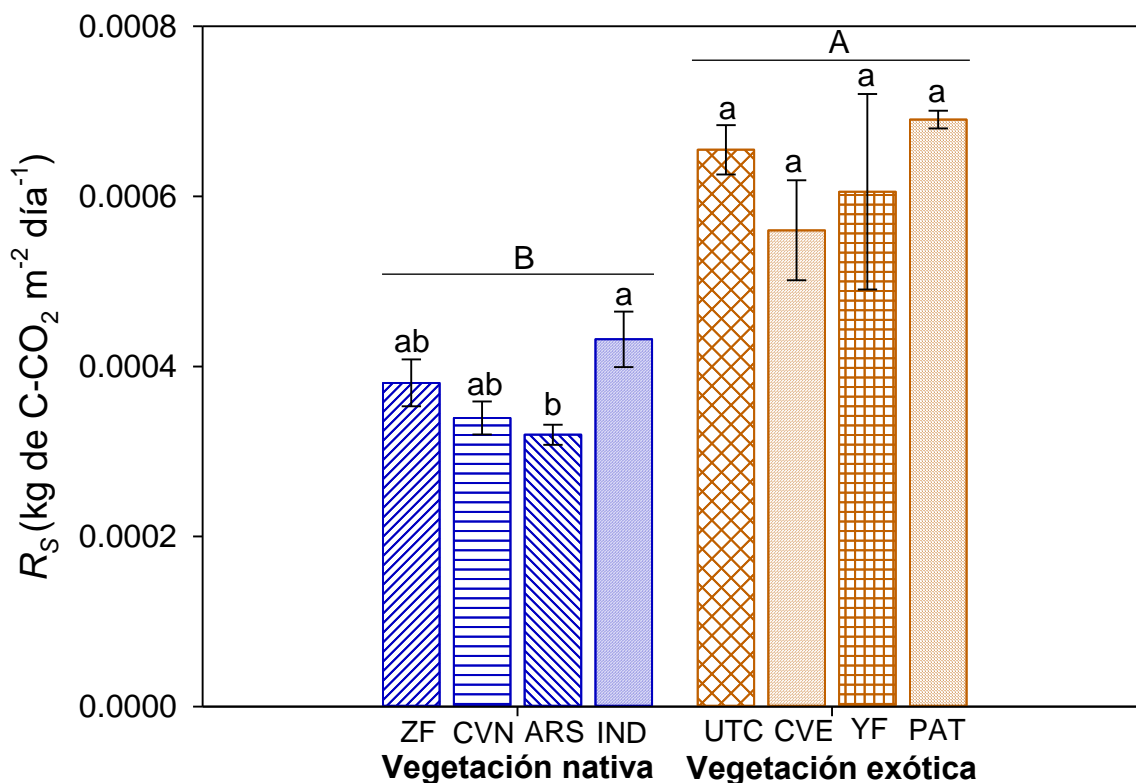
## **6. RESULTADOS**

### **6.1. Potencial de almacén de carbono en el Parque Industrial Ramos Arizpe**

#### **6.1.1. Efecto del tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe en la respiración del suelo y los factores que la controlan**

Las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe con vegetación exótica presentaron una  $R_s$  significativamente mayor ( $P < 0.05$ ) con un promedio de  $0.0006 \pm 0.00003$ , en comparación con las áreas verdes con vegetación nativa que tienen un flujo promedio de  $0.0004 \pm 0.00002$  kg de C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (Figura 7).

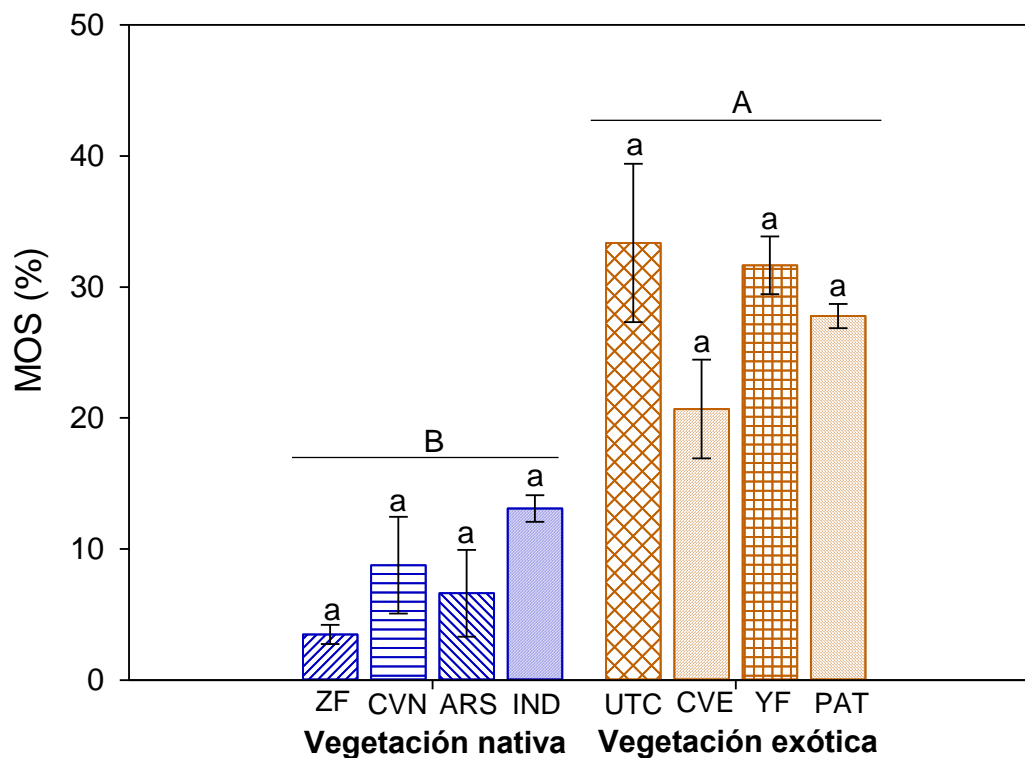
De acuerdo con el análisis de varianza (Figura 7), se encontraron diferencias significativas entre la  $R_s$  ( $0.00032$  kg de C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) de la empresa Arysta (ARS) e Inductotherm (IND) con vegetación nativa que tiene una  $R_s$  de  $0.00042$  kg de C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>.



**Figura 7.** Respiración del suelo asociada al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media  $\pm$  error estándar ( $n=3$ ). Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre empresas para un determinado tipo de vegetación y las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía.

Los resultados de la Figura 8 y 9 muestran que los porcentajes de MOS y COS fueron significativamente mayores para las áreas verdes con vegetación exótica, en comparación a las áreas verdes con vegetación nativa.

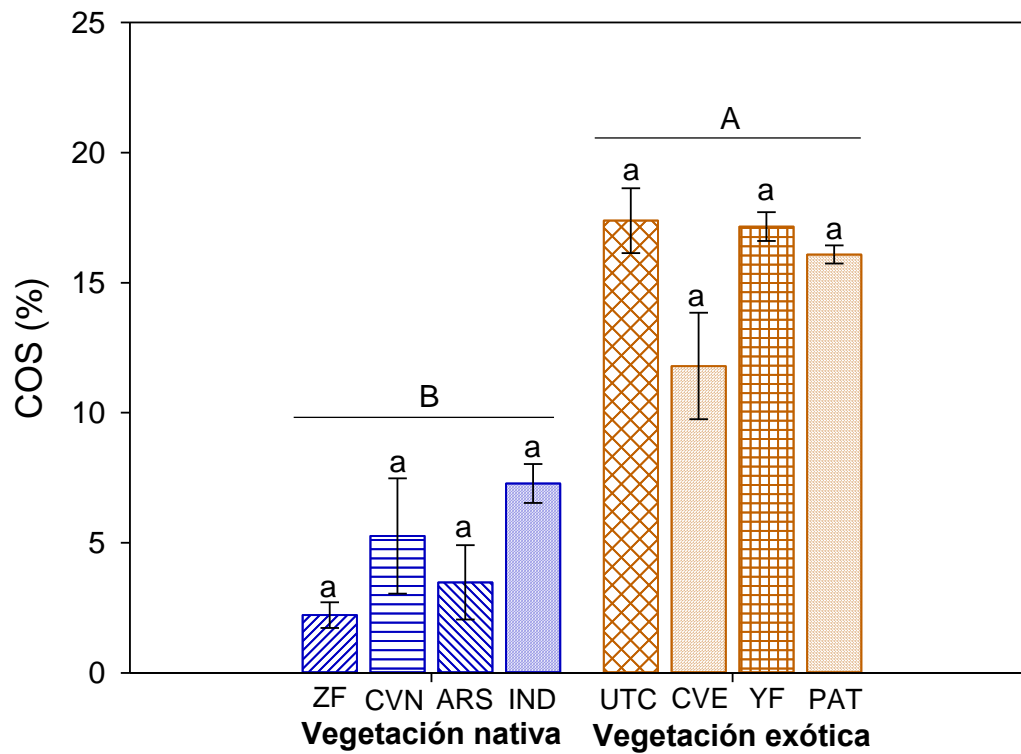
El análisis mostró diferencias significativas entre el porcentaje de humedad del suelo según el tipo de vegetación en las áreas verdes (Figura 10). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de humedad del suelo entre las empresas con el mismo tipo de vegetación. Por lo tanto, la humedad del suelo fue significativamente mayor para en la vegetación exótica con un promedio de  $30.09\% \pm 3.57$ , en comparación con el porcentaje promedio de las áreas verdes con vegetación nativa con  $5.89\% \pm 1.19$ .



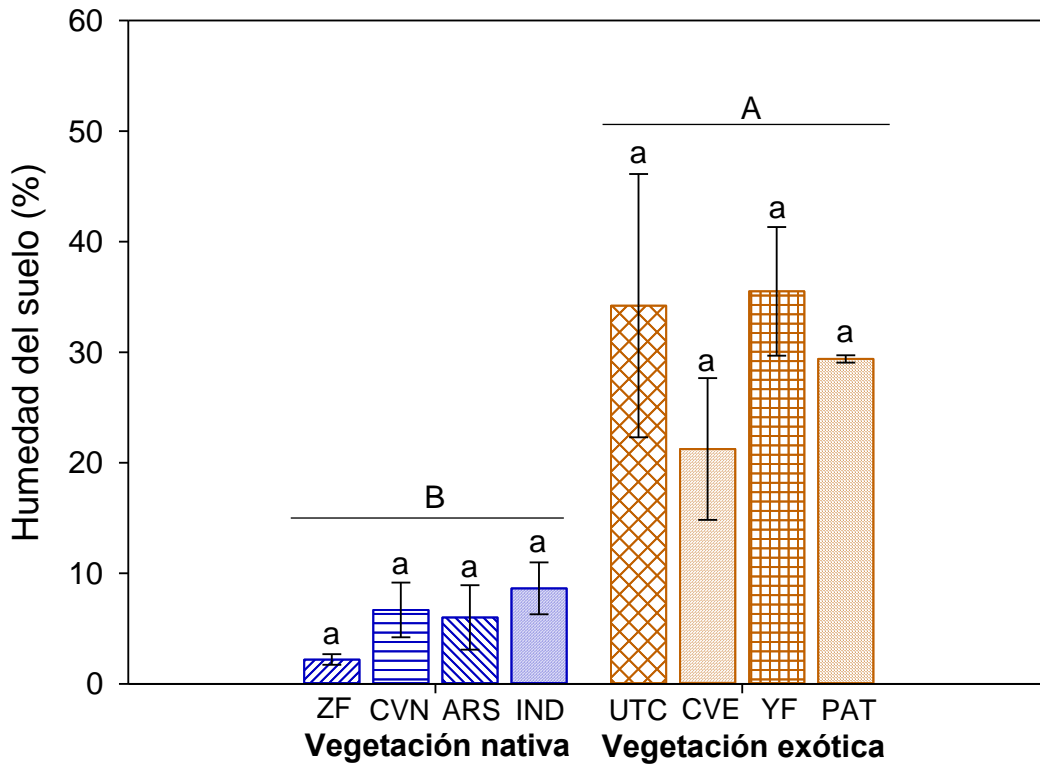
**Figura 8.** Materia orgánica del suelo asociada al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media  $\pm$  error estándar ( $n=3$ ). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía.

El CT, CIS y COS fueron fuertemente influenciados por el tipo de vegetación en las áreas verdes (Tabla 4). En las áreas verdes con vegetación nativa se encontraron valores significativamente más bajos para CT, CIS y COS (9.95, 5.39 y 4.56%, respectivamente), en comparación con las áreas verdes con vegetación exótica (22.90, 7.29 y 15.61%, respectivamente). Además, los valores de CIS para áreas verdes con vegetación nativa fueron mayores en comparación con los porcentajes de COS para estas mismas áreas verdes.

Los valores de pH en el suelo no mostraron diferencias significativas entre el tipo de vegetación de las áreas verdes (Tabla 4). Sin embargo, el área verde de la empresa Inductotherm (IND) presenta un pH significativamente menor al del área verde con el mismo tipo de vegetación de la empresa Arysta (ARS).



**Figura 9.** Carbono orgánico del suelo asociado al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media  $\pm$  error estándar ( $n=3$ ). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía.



**Figura 10.** Humedad del suelo asociada al tipo de vegetación en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las áreas verdes con vegetación nativa están representadas por el color azul y las empresas con vegetación exótica por el color guinda. Las empresas están representadas con las diferentes tramas. Los valores son la media  $\pm$  error estándar ( $n=3$ ). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía.

**Tabla 4.** Características fisicoquímicas del suelo asociadas al tipo de vegetación (nativa y exótica) en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

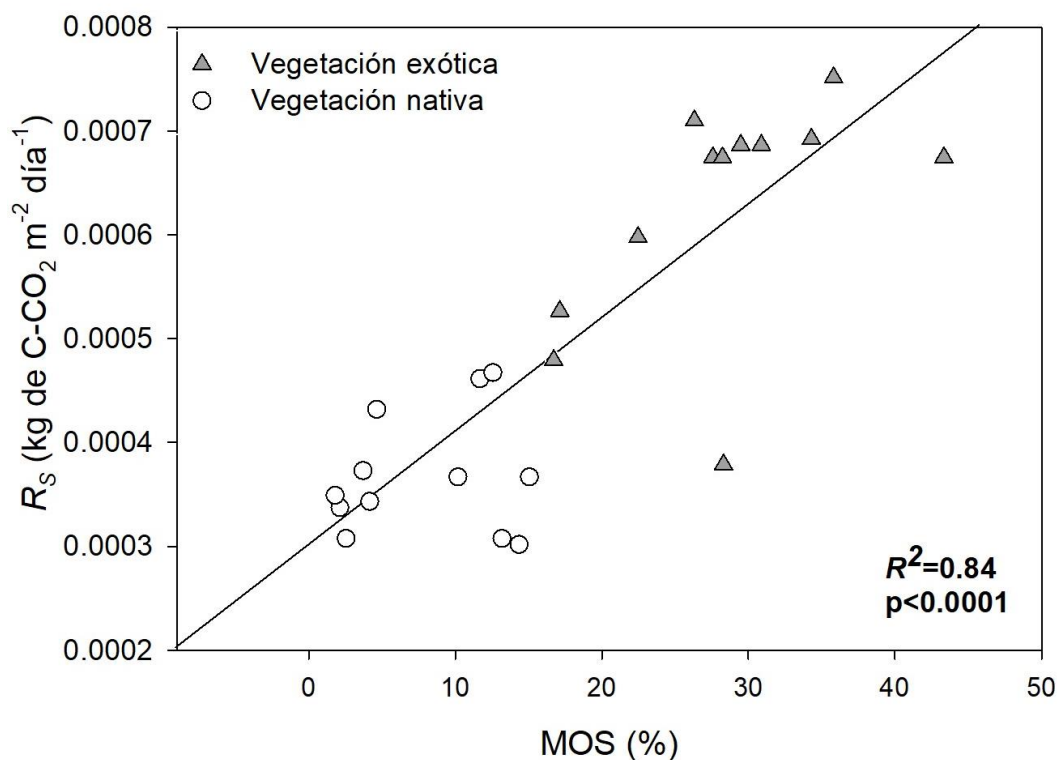
Determinación	Vegetación nativa				Vegetación exótica			
	ZF	CVN	ARS	IND	UTC	CVE	YF	PAT
CIS (%)	4.38 <sup>B,a</sup>	6.87 <sup>B,a</sup>	4.30 <sup>B,a</sup>	6.01 <sup>B,a</sup>	8.32 <sup>A,a</sup>	6.08 <sup>A,b</sup>	7.49 <sup>A,ab</sup>	7.28 <sup>A,ab</sup>
CT (%)	6.60 <sup>B,b</sup>	12.14 <sup>B,ab</sup>	7.78 <sup>B,ab</sup>	13.29 <sup>B,a</sup>	25.71 <sup>A,a</sup>	17.88 <sup>A,b</sup>	24.65 <sup>A,a</sup>	23.37 <sup>A,ab</sup>
NT (%)	0.12 <sup>B,a</sup>	0.17 <sup>B,a</sup>	0.15 <sup>B,a</sup>	0.24 <sup>B,a</sup>	0.43 <sup>A,a</sup>	0.31 <sup>A,a</sup>	0.42 <sup>A,a</sup>	0.41 <sup>A,a</sup>
pH	9.47 <sup>A,ab</sup>	9.01 <sup>A,ab</sup>	9.66 <sup>A,a</sup>	8.58 <sup>A,b</sup>	8.92 <sup>A,a</sup>	9.09 <sup>A,a</sup>	9.10 <sup>A,a</sup>	9.13 <sup>A,a</sup>
CE (µs/cm)	1038.73 <sup>A,b</sup>	1875.53 <sup>A,ab</sup>	738.37 <sup>A,b</sup>	4067 <sup>A,a</sup>	2094 <sup>A,a</sup>	1118 <sup>A,a</sup>	1290.67 <sup>A,a</sup>	1195.77 <sup>A,a</sup>

Los valores son la media  $\pm$  error estándar (n=3). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación y las letras minúsculas indican diferencias significativas entre empresas para un determinado tipo de vegetación, con base en la comparación post-hoc por la prueba de Tukey (P< 0.05) del ANOVA de una vía. CIS= carbono inorgánico del suelo, CT= carbono total, NT= nitrógeno total y CE= conductividad eléctrica.

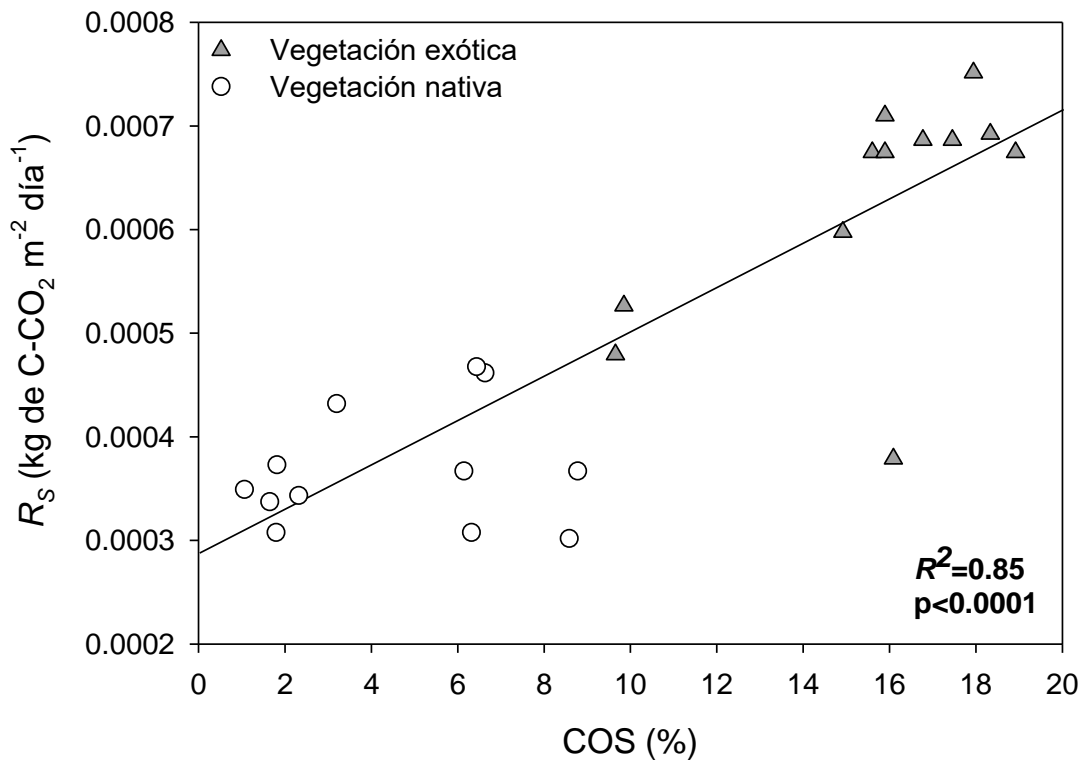
### 6.1.2. Relación entre variables en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe

Se encontraron correlaciones positivas entre la  $R_s$  con la humedad del suelo, el COS y la MOS.

La MO y el COS se correlacionaron positivamente con la  $R_s$  en 84 y 85%, respectivamente (Figura 11 y 12, respectivamente). Es decir, a un mayor porcentaje de materia orgánica también se tuvo una mayor respiración por parte del suelo como se observó en las áreas verdes con vegetación exótica; caso contrario a lo que sucedió en las áreas verdes con vegetación nativa, en donde al tener valores más bajos de MOS en comparación con las áreas verdes con vegetación exótica presentan una menor liberación de  $CO_2$  por parte del suelo.



**Figura 11.** Correlación de Pearson entre la  $R_s$  y el porcentaje de MOS en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

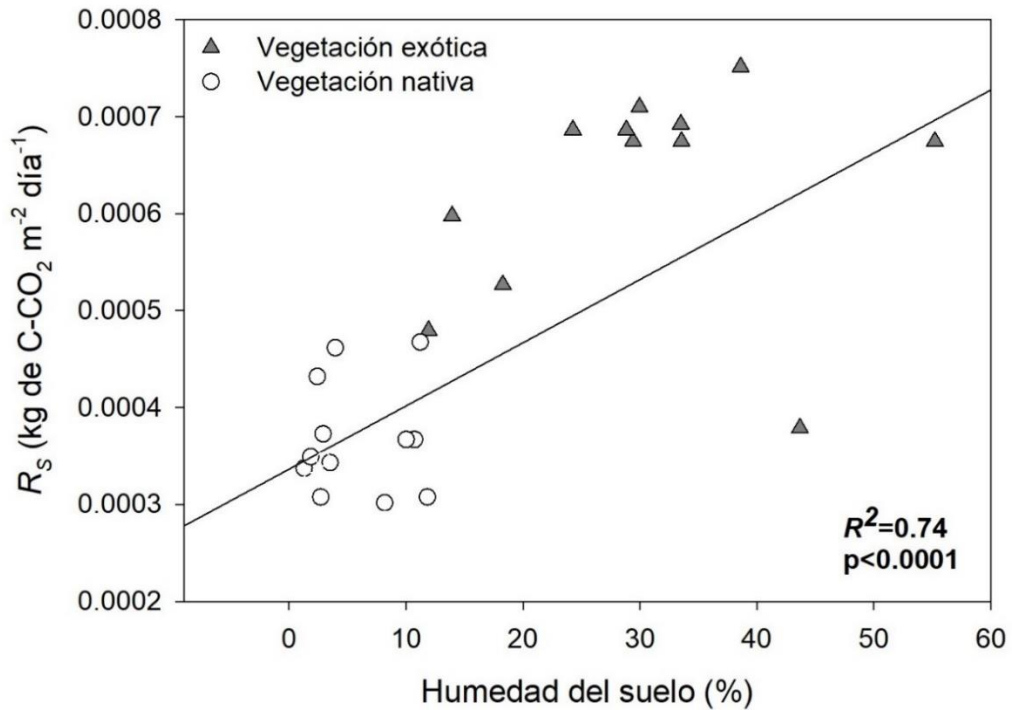


**Figura 12.** Correlación de Pearson entre la  $R_s$  y el porcentaje de COS en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

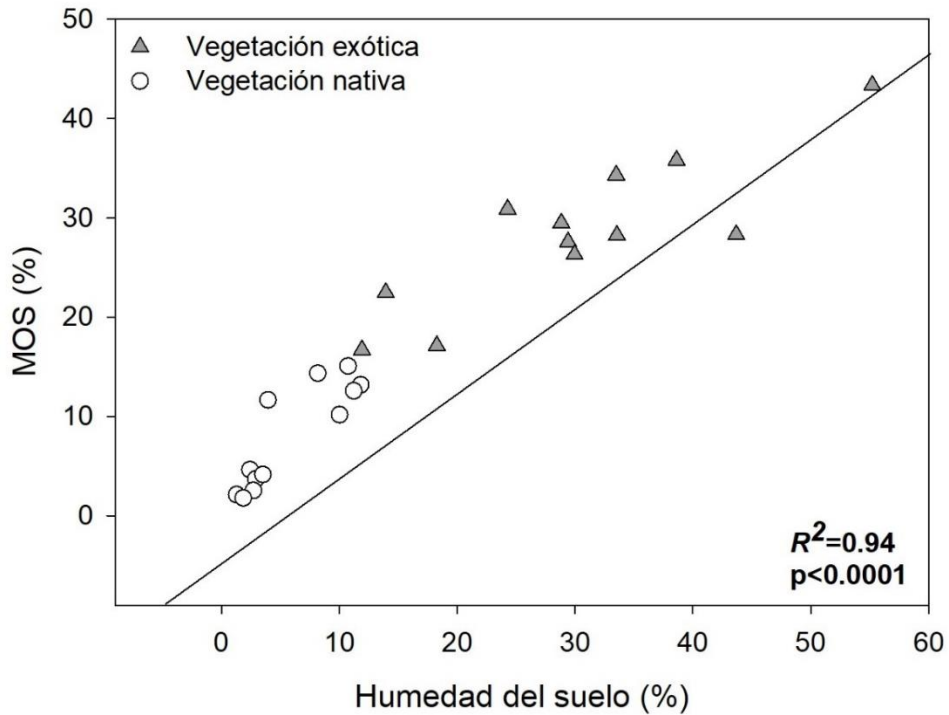
Se encontró que la humedad del suelo se correlacionó de manera positiva con la  $R_s$  (Figura 13). Es decir que la  $R_s$  es explicada en 74% por la humedad del suelo. Se puede observar en la Figura 13 que los valores de humedad del suelo y  $R_s$  más altos se encuentran en las áreas verdes con vegetación exótica, a excepción de uno de los puntos de muestreo de la empresa Yanfeng (YF) que presenta un valor alto de humedad (43.67%) y una respiración del suelo por debajo de algunas áreas verdes con vegetación nativa.

La materia orgánica del suelo se correlacionó positivamente con el porcentaje de humedad del suelo en 94% (Figura 14). Las áreas verdes con vegetación nativa presentaron porcentajes de humedad y MOS más bajos en comparación con las áreas verdes con vegetación exótica.





**Figura 13.** Correlación de Pearson entre la  $R_s$  y el porcentaje de humedad del suelo en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.



**Figura 14.** Correlación de Pearson entre el porcentaje de MOS y el porcentaje de humedad del suelo en los diferentes tipos de vegetación de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.

La  $R_s$  correlacionó positivamente otras propiedades fisicoquímicas del suelo de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe (Tabla 5).

Las propiedades fisicoquímicas del suelo de las áreas verdes también se encuentran correlacionadas de manera positiva entre ellas, como la MOS y COS ( $R^2=0.98$ ,  $p<0.0001$ ). En cuanto al pH, este se correlacionó únicamente de manera negativa con la conductividad eléctrica del suelo en 80% (Tabla 5).

**Tabla 5.** Correlación de Pearson entre las propiedades fisicoquímicas del suelo de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. \* $p<0.05$ ; \*\* $p<0.001$ ; \*\*\* $p<0.0001$ .

	Humedad	MOS	COS	CIS	CT	NT	pH	CE
$R_s$	0.74***	0.84***	0.86***	0.54*	0.84***	0.81***	-0.26	-0.03
Humedad (%)		0.94***	0.90***	0.57*	0.89***	0.82***	-0.21	-0.08
MOS (%)			0.98***	0.61**	0.97***	0.91***	-0.33	0.03
COS (%)				0.62**	0.98***	0.95***	-0.35	0.03
CIS (%)					0.75***	0.61*	-0.34	0.16
CT (%)						0.94***	-0.38	0.06
NT (%)							-0.38	0.12
pH								-0.80***

$R_s$ = respiración del suelo ( $\text{kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), MOS= materia orgánica del suelo, COS= carbono orgánico del suelo, CIS= carbono inorgánico del suelo, CT= carbono total, NT= nitrógeno total y CE= conductividad eléctrica.

### 6.1.3. Almacenamiento de carbono en el suelo de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe

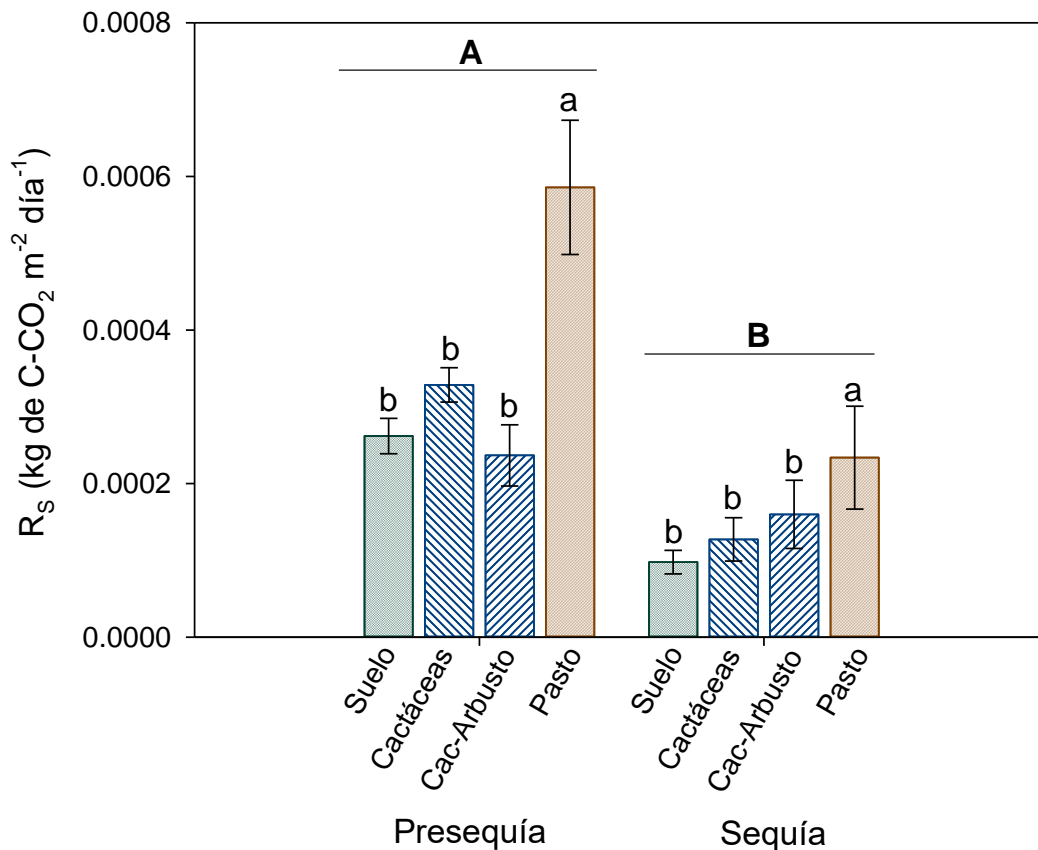
La  $R_s$  y la COS para el resto de la superficie de las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe fueron extrapolados para cada empresa teniendo en cuenta el tipo de vegetación. Los resultados claramente estuvieron en función de la superficie que ocupa el área verde, es decir que a mayor superficie se reflejan mayores valores de  $R_s$ , COS, CIS y CT. Con la excepción de la empresa YF con vegetación exótica a pesar de tener una menor área ( $539.3 \text{ m}^2$ ) en comparación con la empresa IND ( $619 \text{ m}^2$ ) tuvo una mayor  $R_s$ .

## 6.2. Potencial de almacén de carbono en condiciones controladas

### 6.2.1. Efecto de la sequía controlada y el tipo de vegetación en los mesocosmos en la respiración del suelo y los factores que la controlan

La  $R_s$  fue significativamente más alta para el periodo de presequía al que estuvieron sometidos los diferentes tipos de vegetación con un promedio de  $0.0004 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \pm 0.00005$  en comparación al periodo de sequía con un promedio de  $0.0002 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \pm 0.00002$  (Figura 15).

Los mesocosmos con pasto (vegetación exótica) presentaron mayor  $R_s$  con un promedio de  $0.0004 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \pm 0.0001$  en comparación con la vegetación nativa o sin vegetación.



**Figura 15.** Respuesta a la respiración del suelo en distintos tipos de vegetación (nativa y exótica). El control (sin vegetación) está representado con el color verde (trama 1), las cactáceas y cactáceas con arbusto (vegetación nativa) están representadas por el color azul (trama 2 y 3, respectivamente) y el pasto (vegetación exótica) por el color anaranjado (trama 4). Los valores son la media  $\pm$  error estándar ( $n=3$ ). Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre mesocosmos y las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre sequías, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) del ANOVA de una vía.

Como era de esperarse, al ser la variable que se manipuló los porcentajes de humedad del suelo presentaron diferencias significativas entre periodos, en donde la humedad del suelo fue significativamente mayor en el periodo de presequía con un promedio de  $14.58\% \pm 0.60$ , en comparación con el porcentaje promedio del periodo de sequía con  $4.39\% \pm 0.38$ . Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre el tipo de vegetación para cada periodo (Tabla 6).

La sequía afectó negativamente el contenido de materia orgánica del suelo ( $5.24\% \pm 0.22$ ), en comparación con el periodo de presequía ( $8.40\% \pm 0.44$ ), independientemente del tipo de vegetación (Tabla 6). Por otro lado, los mesocosmos con pasto presentaron los mayores porcentajes de MOS en comparación al resto de la vegetación y suelo desnudo. Los mesocosmos sin vegetación, con cactáceas y con cactáceas-arbusto no presentaron diferencias significativas entre los porcentajes de MOS (Tabla 6).

El pH del suelo fue significativamente mayor para el periodo de sequía en comparación al periodo de presequía. El pasto (vegetación exótica) presentó valores de pH significativamente mayores al resto de la vegetación (cactáceas y cactáceas- arbusto) y suelo desnudo (Tabla 6).

El carbono orgánico y la conductividad eléctrica del suelo no presentaron diferencias significativas entre los periodos ni entre los diferentes tipos de vegetación sometidos a los periodos (Tabla 6).

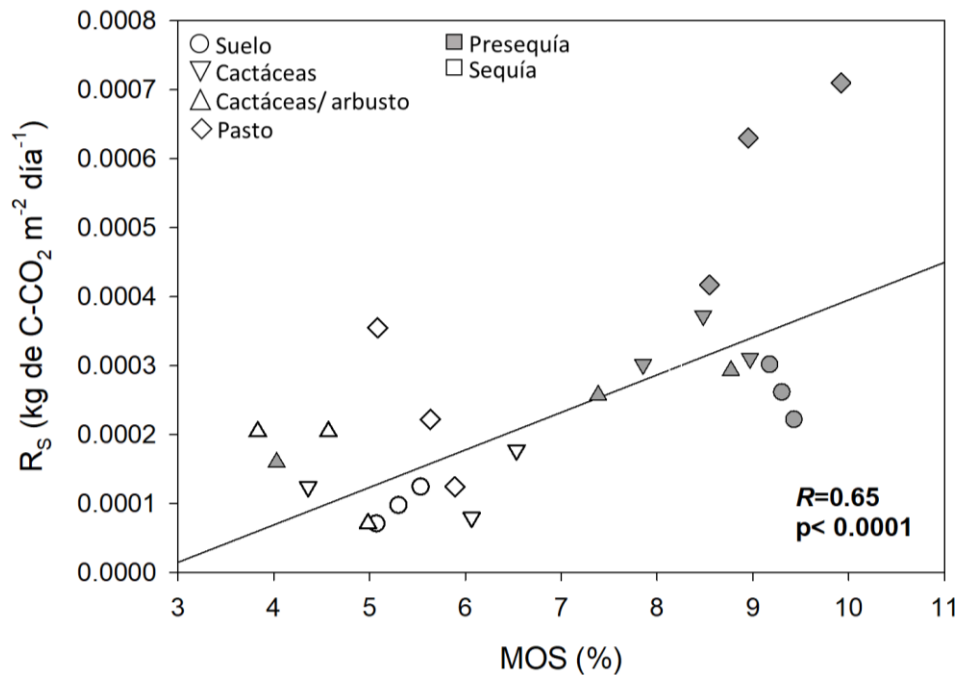
### **6.2.2. Relaciones entre variables de los mesocosmos bajo condiciones controladas**

El análisis de regresión lineal indicó una relación entre la  $R_S$  y la MOS ( $R=0.65$ ,  $p<0.0001$ ) como se observa en la Figura 16. El pasto (vegetación exótica) presentó los valores más altos de MOS ( $7.34\% \pm 0.83$ ) y  $R_S$  ( $0.0004$  kg de C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>  $\pm 0.00009$ ) en comparación al resto de la vegetación para ambos periodos a los que fueron sometidos los diferentes tipos de vegetación. En cambio, las cactáceas y cactáceas-arbusto (vegetación nativa) presentaron valores menores de MOS ( $7.04\% \pm 0.70$  y  $5.60\% \pm 0.82$ , respectivamente) y  $R_S$  ( $0.0002$  kg de C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>  $\pm 0.00005$  y  $0.0002$  kg de C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>  $\pm 0.00003$ , respectivamente) en ambos periodos, en comparación con pasto (Figura 16)

**Tabla 6.** Características fisicoquímicas del suelo asociadas al tipo de vegetación (nativa y exótica) en los mesocosmos del invernadero sometidos a presequía o sequía.

Determinación	Presequía				Sequía			
	Suelo	Cactáceas	Cac/arbusto	Pasto	Suelo	Cactáceas	Cac/arbusto	Pasto
MOS (%)	9.30 <sup>A,ab</sup>	8.44 <sup>A,ab</sup>	8.08 <sup>A,b</sup>	9.14 <sup>A,a</sup>	5.31 <sup>B,ab</sup>	5.65 <sup>B,ab</sup>	4.46 <sup>B,b</sup>	5.54 <sup>B,a</sup>
COS (%)	1.20 <sup>A,a</sup>	1.25 <sup>A,a</sup>	1.11 <sup>A,a</sup>	1.21 <sup>A,a</sup>	1.11 <sup>A,a</sup>	1.19 <sup>A,a</sup>	1.23 <sup>A,a</sup>	1.34 <sup>A,a</sup>
Humedad (%)	14.24 <sup>A,a</sup>	15.84 <sup>A,a</sup>	13.00 <sup>A,a</sup>	15.55 <sup>A,a</sup>	4.84 <sup>B,a</sup>	4.21 <sup>B,a</sup>	3.44 <sup>B,a</sup>	5.07 <sup>B,a</sup>
pH	8.19 <sup>A,ab</sup>	8.13 <sup>A,ab</sup>	8.08 <sup>A,b</sup>	8.35 <sup>A,a</sup>	8.27 <sup>B,ab</sup>	8.30 <sup>B,ab</sup>	8.27 <sup>B,ab</sup>	8.25 <sup>B,ab</sup>
CE (µs/cm)	2192.5 <sup>A,b</sup>	3296 <sup>A,a</sup>	3631 <sup>A,a</sup>	2119 <sup>A,b</sup>	2192 <sup>A,b</sup>	3905 <sup>A,a</sup>	3443 <sup>A,a</sup>	2564 <sup>A,b</sup>

Los valores son la media  $\pm$  error estándar (n=3). Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre el tipo de vegetación a un determinado periodo y las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre los periodos para un determinado tipo de vegetación, según la comparación post-hoc por la prueba de Tukey (P < 0.05) del ANOVA de una vía. MOS= materia orgánica del suelo, COS= carbono orgánico del suelo y CE= conductividad eléctrica.

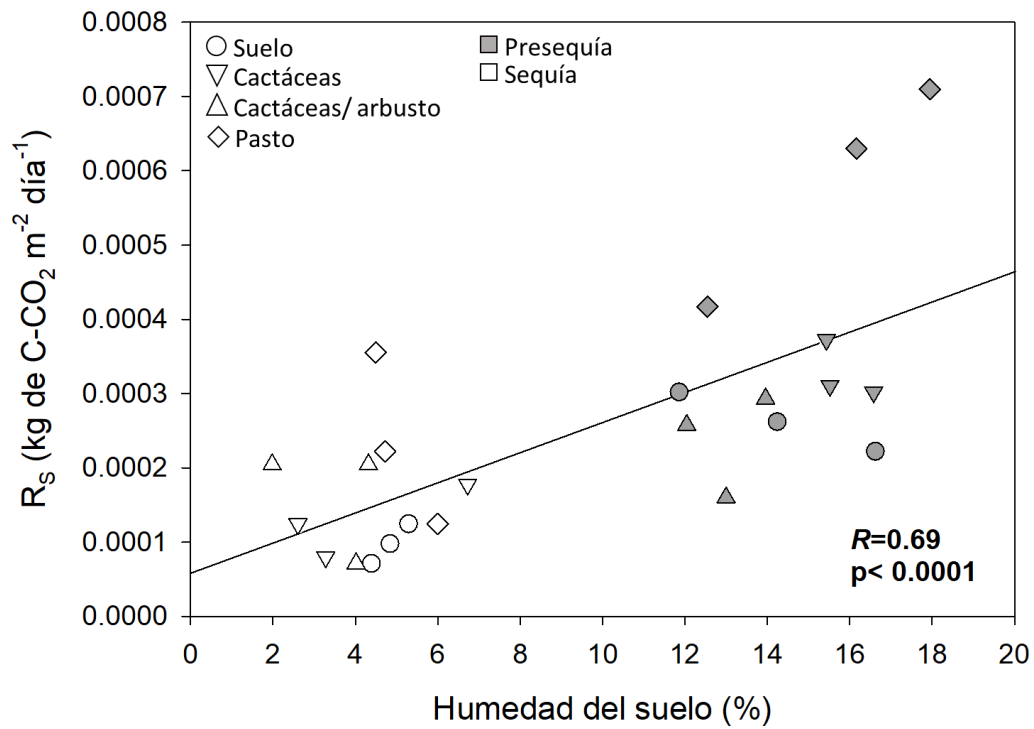


**Figura 16.** Regresión lineal entre la  $R_s$  y el porcentaje de MOS en los diferentes tipos de vegetación sometidos a sequía. Se presentan los valores de  $R$  y  $P$  de una regresión lineal.

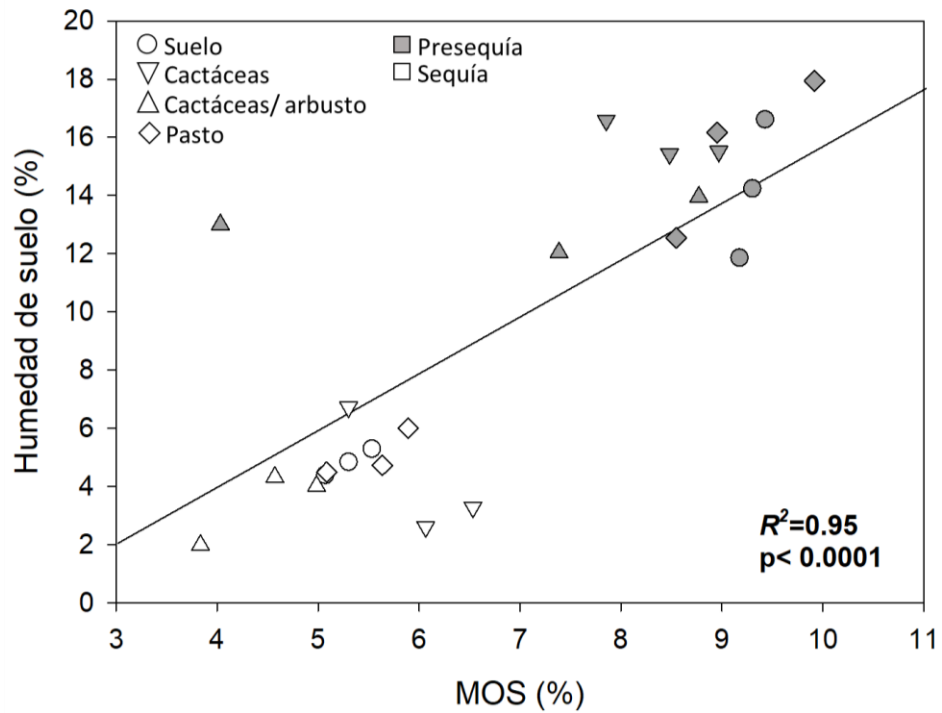
De igual forma, la humedad del suelo se relacionó positivamente con la respiración del suelo ( $R=0.69$ ,  $p<0.0001$ ). Es decir que la  $R_s$  fue explicada en 69% por los porcentajes de humedad del suelo (Figura 17). En el pasto (vegetación exótica) se presentó una mayor  $R_s$  ( $0.0006 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \pm 0.00009$ ) durante el periodo de presequía derivado de los altos porcentajes de humedad ( $15.55\% \pm 1.59$ ). Los valores menores de  $R_s$  se presentaron en el periodo de sequía, relacionados con los bajos porcentajes de humedad del suelo, especialmente en el caso de los suelos con cactáceas ( $0.0001 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \pm 0.00003$ ) y el suelo desnudo ( $0.0001 \text{ kg de C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \pm 0.00002$ ).

La MOS se correlacionó de manera positiva con la humedad del suelo ( $R^2=0.95$ ,  $p<0.0001$ ) de tal manera que los mayores valores de MOS y humedad del suelo ( $8.40\% \pm 0.44$  y  $14.59\% \pm 0.60$ , respectivamente) se presentaron en la vegetación del periodo de presequía (Figura 18).

El resto de las variables (COS, pH y CE) no presentaron ninguna correlación (Tabla 7).



**Figura 17.** Regresión lineal entre la  $R_s$  y el porcentaje de humedad del suelo en los diferentes tipos de vegetación sometidos a sequía. Se presentan los valores de  $R$  y  $P$  de una regresión lineal.



**Figura 18.** Correlación entre el porcentaje de humedad del suelo y el porcentaje de MOS en los diferentes tipos de vegetación sometidos a sequía.

**Tabla 7.** Correlación de Pearson entre las propiedades fisicoquímicas del suelo de los mesocosmos en el invernadero (\*\*p<0.0001).

	<b>Humedad del suelo</b>	<b>MOS</b>	<b>COS</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>
<i>R<sub>S</sub></i>	0.69***	0.65***	0.15	0.13	-0.38
Humedad (%)		0.95***	0.004	-0.34	-0.24
MOS (%)			-0.09	-0.27	-0.27
COS (%)				0.08	-0.11
pH					-0.23

*R<sub>S</sub>*= respiración del suelo (kg de C- CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>), MOS= materia orgánica del suelo, COS= carbono orgánico del suelo y CE= conductividad eléctrica.

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados de *R<sub>S</sub>* en las áreas verdes del presente estudio se explican principalmente por las condiciones de riego a las que estaban sometidos los diferentes tipos de vegetación [8, 11]. En las áreas verdes con vegetación exótica del Parque Industrial Ramos Arizpe, de acuerdo con las encuestas realizadas existe un riego constante y abundante, mientras que en las áreas verdes con vegetación nativa el riego es nulo. Así mismo para los mesocosmos ubicados en el invernadero, en donde la *R<sub>S</sub>* fue mayor en el periodo de presequía comparado al periodo de sequía.

Otro factor que influye en la *R<sub>S</sub>* es el tipo de vegetación por sus diferentes requerimientos de agua, mantenimiento y metabolismo, como se pudo observar en este estudio en donde el pasto mostró una mayor *R<sub>S</sub>* en comparación a la vegetación nativa [39].

Los mayores porcentajes de MOS en las áreas verdes con vegetación exótica (pastos) son explicados por la mayor cantidad de biomasa (aérea y raíces), la cual incrementa la cantidad de materiales orgánicos al suelo [71]. Esto puede ser explicado por el tipo de metabolismo en la mayoría de los pastos (C3) que se utilizan en las áreas verdes, el cual permite un mayor suministro de biomasa para la formación de materia orgánica en el suelo. En cambio, la vegetación nativa propia de regiones áridas se caracteriza por tener un metabolismo tipo CAM, y por lo tanto tiene una tasa de crecimiento lenta,



suministrando una menor cantidad de biomasa en comparación con otros tipos de vegetación [42].

En las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe con vegetación exótica de acuerdo con los resultados de las encuestas, antes de ser sembrado el pasto se realizó una mezcla de suelo de la región con suelo de uso comercial para jardines y la adición de humus siendo un factor en los altos porcentajes de MOS comparados con las áreas verdes con vegetación nativa.

Los resultados de un alto contenido de humedad en el suelo coinciden con la cantidad y frecuencia de riego de las áreas verdes con vegetación exótica (pasto), para ambas aproximaciones en el presente estudio.

La relación entre la MOS con la  $R_s$  refuerza el hecho de que la respiración del suelo resulta en su mayoría de la descomposición de la materia orgánica joven, dependiendo entonces de la producción primaria de la vegetación [35]. Por lo tanto, el tipo de vegetación tiene efectos sobre las características del suelo debido a su contribución con materiales orgánicos que una vez descompuestos pasan a formar parte de la MOS, por lo que los valores más bajos de respiración del suelo en las áreas verdes con vegetación nativa se atribuyen en parte a los bajos porcentajes de MOS y a su metabolismo tipo CAM. En contraste, la vegetación exótica (pasto) tiene una tasa de crecimiento mayor por su tipo de metabolismo (C3), así como a la existencia de materia orgánica lábil.

Se ha observado en otros estudios que la  $R_s$  tiende a aumentar con el aumento de la humedad del suelo [8, 72, 73], al igual que en este estudio. La humedad del suelo también influye en la  $R_s$  a través de la actividad autótrofa (raíces), bacterias heterótrofas y hongos que actúan como descomponedores [28].

Las condiciones de humedad en el suelo controlan la supervivencia y actividad de los microorganismos en los suelos [56], así como la difusión de nutriente para los microorganismos [28, 73]. Es decir, en zonas áridas y en periodos de sequía en donde el agua es escasa el funcionamiento de las comunidades microbianas se encuentra limitado, disminuyendo así su actividad metabólica a cierto nivel de aridez [74] reflejándose en una menor liberación de  $CO_2$  en el suelo de las áreas verdes con

vegetación nativa. No obstante, el pasto bajo esas condiciones de aridez no se encuentra apto para ser utilizado en áreas verdes debido a que muere por la falta de agua.

La materia orgánica del suelo también se correlacionó positivamente con el porcentaje de humedad del suelo. La materia orgánica retiene la humedad del suelo, debido a que modifica la estructura del mismo, dejando una mayor cantidad de espacios en la que pueda ser almacenada [35]. Asimismo, la materia orgánica disminuye la temperatura del suelo, evitando la evaporación del agua [75]. Además, uno de los factores que influye en la descomposición de la MOS es la humedad, la cual influye en la velocidad a la que los microorganismos transforman parte de la MOS en CO<sub>2</sub> [76].

Las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe con vegetación exótica almacenan más carbono en el suelo que las áreas verdes con vegetación nativa. Sin embargo, el carbono almacenado en las áreas verdes con vegetación nativa permanece almacenado durante más tiempo debido a que esta se desarrolla en suelos con bajos porcentajes de humedad (<12 %) y materia orgánica (<15 %), resultando en una menor liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. En cambio, las áreas verdes con vegetación exótica liberan más rápidamente el carbono almacenado en el suelo.

El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS) de los mesocosmos con pasto (1.56 kg de C m<sup>-2</sup>) es comparable con un estudio en donde los pastos ornamentales presentaron bajos almacenes de COS iniciales (1.2 kg de C m<sup>-2</sup>) [62]. En otro estudio las concentraciones de COS fueron menores (<2%) para pastos con menos de 3 años de establecimiento en comparación a pastos con más de 25 años de establecidos [1].

## **6. CONCLUSIONES**

La vegetación nativa (cactáceas y arbustos) de las áreas verdes urbanas ubicadas en zonas áridas disminuye significativamente la respiración del suelo, comparada con la respiración del suelo de áreas verdes con vegetación exótica (pastos), debido a la dependencia que tienen estos al riego y a la interacción entre factores como la MOS y la humedad del suelo. Por su parte, la vegetación nativa tiene bajos requerimientos de agua aún en periodos de sequía y se desarrolla en suelos con porcentajes bajos de materia orgánica.

El uso de pasto en áreas verdes en zonas áridas resulta en un mayor almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS) en comparación al uso de vegetación nativa. Sin embargo, este COS se mineraliza rápidamente, con una mayor liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, como resultado de los riegos necesarios para el mantenimiento de dichas áreas, por lo que las áreas de vegetación nativa representan almacenes de carbono más estables a largo plazo, incrementando los servicios ecosistémicos brindados por las mismas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Kong, Z. Shi, and L.M. Chu. Carbon emission and sequestration of urban turfgrass systems in Hong Kong. *Sci. Total Environ.* 473–474 (2014) 132-138.
- [2] B.G. Rawlins, J. Harris, S. Price, and M. Bartlett. A review of climate change impacts on urban soil functions with examples and policy insights from England, UK. *Soil Use Manage.* 31 (2015) 46-61.
- [3] H. Yang, X. Li, Z. Wang, R. Jia, L. Liu, Y. Chen, Y. Wei, Y. Gao, and G. Li. Carbon sequestration capacity of shifting sand dune after establishing new vegetation in the Tengger Desert, northern China. *Sci. Total Environ.* 478 (2014) 1-11.
- [4] J. Bae and Y. Ryu. Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park. *Landscape Urban Plann.* 136 (2015) 57-67.
- [5] N. Montaña, F. Ayala, S. Bullock, O. Briones, O. García, S. García, Y. Maya, Y. Perroni, C. Siebe, and T. Tapia. Carbon stocks and fluxes in arid and semiarid ecosystems of Mexico: synthesis and prospects. *Terra Latino.* 34 (2016) 39-59.
- [6] Y. Yigini and P. Panagos. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. *Sci. Total Environ.* 557–558 (2016) 838-850.
- [7] Y. Yan, C. Zhang, Y. Hu, and W. Kuang. Urban land-cover change and its impact on the ecosystem carbon storage in a dryland city. *Remote Sensing.* 8 (2015) 6.
- [8] B. Koerner and J. Klopatek. Anthropogenic and natural CO<sub>2</sub> emission sources in an arid urban environment. *Environ. Pollut.* 116 (2002) S45-S51.
- [9] A. Ball, P. Farage, L. Olsson, J. Pretty, A. Warren, and P. Tschakert, Carbon sequestration in dryland soils, Food and Agriculture Organization, 2004.
- [10] C. Lefèvre, F. Rekik, V. Alcantara, and L. Wiese, Soil organic carbon: the hidden potential, 2017.

- [11] L.F. Weissert, J.A. Salmond, and L. Schwendenmann. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO<sub>2</sub> efflux across urban land use and soil cover types. *Geoderma*. 271 (2016) 80-90.
- [12] S.J. Livesley, A. Ossola, C.G. Threlfall, A.K. Hahs, and N.S. Williams. Soil carbon and carbon/nitrogen ratio change under tree canopy, tall grass, and turf grass areas of urban green space. *J. Environ. Qual.* 45 (2016) 215-23.
- [13] G. Conti, S. Díaz, and S. Lavorel. Plant functional diversity and carbon storage - an empirical test in semi-arid forest ecosystems. *J. Ecol.* 101 (2013) 18-28.
- [14] L.E. Koteen, D.D. Baldocchi, and J. Harte. Invasion of non-native grasses causes a drop in soil carbon storage in California grasslands. *Environ. Res. Lett.* 6 (2011) 044001.
- [15] S.M. Smetana and J.C. Crittenden. Sustainable plants in urban parks: A life cycle analysis of traditional and alternative lawns in Georgia, USA. *Landscape Urban Plann.* 122 (2014) 140-151.
- [16] IPCC, Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático, 2014.
- [17] M. Sterner, Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems: limiting global warming by transforming energy systems, kassel university press GmbH, 2009.
- [18] D.J. Arent, A. Wise, and R. Gelman. The status and prospects of renewable energy for combating global warming. *Energ. Econ.* 33 (2011) 584-593.
- [19] D.J. Nowak and D.E. Crane. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environ. Pollut.* 116 (2002) 381-389.
- [20] D.J. Nowak, E.J. Greenfield, R.E. Hoehn, and E. Lapoint. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environ. Pollut.* 178 (2013) 229-236.
- [21] R. Lal, W. Negassa, and K. Lorenz. Carbon sequestration in soil. *Curr. Opin. Env. Sust.* 15 (2015) 79-86.

- [22] R. Lal. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123 (2004) 1-22.
- [23] E. Velasco, M. Roth, L. Norford, and L.T. Molina. Does urban vegetation enhance carbon sequestration? *Landscape Urban Plann.* 148 (2016) 99-107.
- [24] T.K. Yoon, K.W. Seo, G.S. Park, Y.M. Son, and Y. Son. Surface soil carbon storage in urban green spaces in three major South Korean cities. *Forests*. 7 (2016) 115.
- [25] E.G. Jobbágy and R.B. Jackson. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10 (2000) 423-436.
- [26] T.L. Longbottom, A. Townsend-Small, L.A. Owen, and M.K. Murari. Climatic and topographic controls on soil organic matter storage and dynamics in the Indian Himalaya: Potential carbon cycle–climate change feedbacks. *Catena*. 119 (2014) 125-135.
- [27] X. Li, Y. Wang, L. Liu, G. Luo, Y. Li, and X. Chen. Effect of land use history and pattern on soil carbon storage in arid region of Central Asia. *PLoS ONE*. 8 (2013) e68372.
- [28] L. Yiqi and X. Zhou, *Soil respiration and the environment*, Elsevier, 2010.
- [29] L. Stringer, A. Dougill, A. Thomas, D. Spracklen, S. Chesterman, C.I. Speranza, H. Rueff, M. Riddell, M. Williams, and T. Beedy. Challenges and opportunities in linking carbon sequestration, livelihoods and ecosystem service provision in drylands. *Environ. Sci. Policy*. 19 (2012) 121-135.
- [30] J. Albaladejo, R. Ortiz, N. Garcia-Franco, A.R. Navarro, M. Almagro, J. Pintado, and M. Martínez-Mena. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. *J. Soils Sed.* 13 (2012) 265-277.
- [31] J.L. Edmondson, Z.G. Davies, S.A. McCormack, K.J. Gaston, and J.R. Leake. Land-cover effects on soil organic carbon stocks in a European city. *Sci. Total Environ.* 472 (2014) 444-53.
- [32] J. Mi, J. Li, D. Chen, Y. Xie, and Y. Bai. Predominant control of moisture on soil organic carbon mineralization across a broad range of arid and semiarid ecosystems on the Mongolia plateau. *Landscape Ecol.* 30 (2015) 1683-1699.

- [33] P. Trivedi, B.P. Singh, and B.K. Singh, Chapter 1 - Soil carbon: introduction, importance, status, threat, and mitigation, in *Soil Carbon Storage*, B.K. Singh, Academic Press, 2018. p. 1-28.
- [34] S. Banwart, H. Black, Z. Cai, P. Gicheru, H. Joosten, R. Victoria, E. Milne, E. Noellemeyer, U. Pascual, and G. Nziguheba. Benefits of soil carbon: report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop. *Carbon Manag.* 5 (2014) 185-192.
- [35] L. Lai, J. Wang, Y. Tian, X. Zhao, L. Jiang, X. Chen, Y. Gao, S. Wang, and Y. Zheng. Organic matter and water addition enhance soil respiration in an Arid region. *PLoS ONE.* 8 (2013) e77659.
- [36] E.J. Sayer, J.S. Powers, and E.V. Tanner. Increased litterfall in tropical forests boosts the transfer of soil CO<sub>2</sub> to the atmosphere. *PLoS One.* 2 (2007) e1299.
- [37] E.W. Sulzman, J.B. Brant, R.D. Bowden, and K. Lajtha. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO<sub>2</sub> efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry.* 73 (2005) 231-256.
- [38] F.E. Moyano, S. Manzoni, and C. Chenu. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biol. Biochem.* 59 (2013) 72-85.
- [39] J.W. Raich and A. Tufekciogul. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry.* 48 (2000) 71-90.
- [40] M. Lange, M. Habekost, N. Eisenhauer, C. Roscher, H. Bessler, C. Engels, Y. Oelmann, S. Scheu, W. Wilcke, and E.-D. Schulze. Biotic and abiotic properties mediating plant diversity effects on soil microbial communities in an experimental grassland. *PloS one.* 9 (2014) e96182.
- [41] P.S. Nobel. Achievable productivities of certain CAM plants: basis for high values compared with C3 and C4 plants. *New Phytol.* 119(2) (1991) 183-205.

- [42] H.M. Hernández, *La vida en los desiertos mexicanos*, Fondo de cultura económica Mexico City, Mexico, 2006.
- [43] S. Wan, R.J. Norby, J. Ledford, and J.F. Weltzin. Responses of soil respiration to elevated CO<sub>2</sub>, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biol.* 13 (2007) 2411-2424.
- [44] S. Chen, J. Zou, Z. Hu, H. Chen, and Y. Lu. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data. *Agric. Forest Meteorol.* 198 (2014) 335-346.
- [45] M. Reichstein, J.A. Subke, A.C. Angeli, and J.D. Tenhunen. Does the temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter depend upon water content, soil horizon, or incubation time? *Global Change Biol.* 11 (2005) 1754-1767.
- [46] J. Schimel, T.C. Balser, and M. Wallenstein. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology.* 88 (2007) 1386-1394.
- [47] L. Xu, D.D. Baldocchi, and J. Tang. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochem. Cycles.* 18 (2004).
- [48] R. Lai and N. Fausey, *Land use and soil management effects of emissions of radiatively active gases from two soils in Ohio*, in *Soil Management and Greenhouse Effect*, CRC Press, 2018. p. 55-55.
- [49] R. Becerril-Piña, C.A. Mastachi-Loza, E. González-Sosa, C. Díaz-Delgado, and K.M. Bâ. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *J. Arid Environ.* 120 (2015) 4-13.
- [50] O. Martínez and M. Carrillo, *Caracterización y análisis de la sequía en el estado de Coahuila*, 2005.
- [51] R. Maliva and T. Missimer, *Aridity and drought*, in *Arid lands water evaluation and management*, Springer, 2012. p. 21-39.



- [52] F.V. Alfredo, Nueva guía de cactáceas del estado de Coahuila Quintanilla Ediciones ed, 2016.
- [53] H.B.-. Hollis, Las cactáceas de México, México, 1978.
- [54] D.A. Wardle, Communities and ecosystems: linking the aboveground and belowground components, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2002.
- [55] D. Flores-Rentería, A. Rincón, F. Valladares, and J. Curiel Yuste. Agricultural matrix affects differently the alpha and beta structural and functional diversity of soil microbial communities in a fragmented Mediterranean holm oak forest. *Soil Biol. Biochem.* 92 (2016) 79-90.
- [56] Y.-g. Wang, H. Zhu, and Y. Li. Spatial heterogeneity of soil moisture, microbial biomass carbon and soil respiration at stand scale of an arid scrubland. *Environ. Earth Sci.* 70 (2013) 3217-3224.
- [57] I. Kowarik, L.K. Fischer, I. Säumel, M. von der Lippe, F. Weber, and J.R. Westermann, Plants in urban settings: From patterns to mechanisms and ecosystem services, in *Perspectives in urban ecology*, Springer, 2011. p. 135-166.
- [58] M. Delgado-Baquerizo, F.T. Maestre, A. Gallardo, M.A. Bowker, M.D. Wallenstein, J.L. Quero, V. Ochoa, B. Gozalo, M. García-Gómez, and S. Soliveres. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. *Nature.* 502 (2013) 672.
- [59] M.W. Strohbach, E. Arnold, and D. Haase. The carbon footprint of urban green space—A life cycle approach. *Landscape Urban Plann.* 104 (2012) 220-229.
- [60] K.C. Seto, M. Fragkias, B. Güneralp, and M.K. Reilly. A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS ONE.* 6 (2011) e23777.
- [61] T.J. Volo, E.R. Vivoni, C.A. Martin, S. Earl, and B.L. Ruddell. Modelling soil moisture, water partitioning, and plant water stress under irrigated conditions in desert urban areas. *Ecohydrology.* 7 (2014) 1297-1313.
- [62] A. Townsend-Small and C.I. Czimczik. Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in urban turf. *Geophys. Res. Lett.* 37 (2010) n/a.

- [63] L. Krishnamurthy, J.R. Nascimento, K. Keipi, D.J. Nowak, J.F. Dwyer, G. Childs, K. Nilsson, T.B. Randrup, T. Tvedt, and R.W. Miller, *Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe*, Inter-American Development Bank, 1998.
- [64] INEGI, *Guías para la interpretación de cartografía edafología*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática Aguascalientes, México, 2004.
- [65] D. Sarkar and A. Haldar, *Physical and chemical methods in soil analysis*, New Age International, 2005.
- [66] M. Pansu and J. Gautheyrou, *Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [67] D. Soriano and V. Pons, *Prácticas de edafología y climatología Alfaomega*, México, 2004.
- [68] E.F. Anderson and R. Brown, *The cactus family*, Timber press Portland, 2001.
- [69] A.y.P. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, *Establecimiento de pastos nativos e introducidos en zonas semiaridas de México*. 2015, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: México D.F.
- [70] M. Pessaraki, *Handbook of turfgrass management and physiology*, CRC press, 2007.
- [71] M.E. Craig, S.M. Pearson, and J.M. Fraterrigo. Grass invasion effects on forest soil carbon depend on landscape-level land use patterns. *Ecology*. 96 (2015) 2265-2279.
- [72] A. Hursh, A. Ballantyne, L. Cooper, M. Maneta, J. Kimball, and J. Watts. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. *Global Change Biol*. 23 (2017) 2090-2103.
- [73] R.T. Conant, P. Dalla-Betta, C.C. Klopatek, and J.M. Klopatek. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biol. Biochem*. 36 (2004) 945-951.
- [74] J. Curiel Yuste, D. Baldocchi, A. Gershenson, A. Goldstein, L. Misson, and S. Wong. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. *Global Change Biol*. 13 (2007) 2018-2035.

[75] E.A. Paul. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biol. Biochem.* 98 (2016) 109-126.

[76] M. Alexander, *Introduction to soil microbiology*, John Wiley and Sons, Inc., 1961.