



**Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
del Instituto Politécnico Nacional**

Unidad Saltillo

Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía

**Evaluación del uso del agua en áreas verdes urbanas de zonas
áridas**

Tesis que presenta:

Ana Laura Rodríguez Sánchez

para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias de las Sustentabilidad de los Recursos
Naturales y Energía**

Directora de tesis:

Dulce Y. Flores Rentería

Saltillo, Coahuila

Septiembre, 2018



“Si hay magia en el planeta, está contenida en el agua.”

Loran Eisely.



Para Héctor

por creer en mí,

por darme su comprensión, cariño y amor,

porque me ha apoyado y acompañado durante esta aventura,

por estar a mi lado en los momentos complicados y recordarme que todo esto valía la pena.



Agradecimientos

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca N° 780558 que me permitió realizar mis estudios de maestría.
- Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.
- Al laboratorio de interacción planta-suelo-atmósfera y de sustentabilidad del suelo, del CINVESTAV Unidad Saltillo.
- A mi directora de tesis, la Dra. Dulce Y. Flores Rentería, por su guía, su entusiasmo, su ingenio, su conocimiento y observaciones al trabajo realizado.
- Al comité de investigación que atinadamente realizaron las observaciones al documento de la tesis con el afán de enriquecer y mejorar su contenido, por su paciencia, su tiempo dedicado y su ayuda.
- A mis sinodales por permitirme compartirles este trabajo y por el tiempo que dedicaron a leerlo.
- A mis padres que con su amor y trabajo me han apoyado y motivado en toda mi formación académica.
- A mis amigos y compañeros de la maestría Carlos Cobos Reyes, Jesús López Salas, Omar Duarte Urbina y muy especialmente a Gabriela Guillén Cruz y Andrés Patricio Torres Gómez, por su ayuda en todo momento, y por compartir tantas experiencias tanto en lo académico como en lo personal.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1 Las zonas urbanas y su microclima	3
2.2 El suelo urbano	4
2.3 El agua en las zonas urbanas	5
2.3.1 El agua en las áreas verdes urbanas de zonas áridas	5
2.3.2 Interacción agua-vegetación	7
2.4 Vegetación de áreas verdes urbanas en zonas áridas	8
2.5 Servicios ecosistemicos	10
3. Justificación	13
4. Hipótesis	14
5. Objetivos	14
5.1 Objetivo general	14
5.2 Objetivos particulares	14
6. Metodología Científica	15
6.1 Determinación del uso de agua y estatus hídrico de áreas verdes urbanas del Parque Industrial Ramos Arizpe	15
6.1.1 Selección de empresas	15
6.1.2 Determinación de la cantidad de riego	16
6.1.3 Análisis de suelo	16
6.1.4 Análisis de vegetación	16
6.1.5 Análisis de datos	17
6.2 Determinación de la evapotranspiración y el WUE de áreas verdes urbanas en condiciones controladas	18
6.2.1 Tiempo 0: Establecimiento de los mesocosmos	18
6.2.2 Tiempo 1: Mantenimiento de los mesocosmos	20
6.2.3 Tiempo 2 y 3: Riego controlado	20
6.2.4 Determinación del Uso Eficiente del Agua	21
6.2.5 Evapotranspiración	22
6.2.6 Análisis de datos	22
7. Resultados	23
7.1 Determinación del uso de agua y estatus hídrico de áreas verdes urbanas del Parque Industrial Ramos Arizpe	23
7.2 Determinación de la evapotranspiración y el WUE de áreas verdes urbanas en condiciones controladas	30
8. Discusión	36
8.1 Determinación del uso de agua y estatus hídrico de áreas verdes urbanas del Parque Industrial Ramos Arizpe	36
8.2 Determinación de la evapotranspiración y WUE de áreas verdes urbanas en condiciones controladas	38
8.3 Discusión general	41
9. Conclusiones	43
10. Bibliografía	44

Lista de tablas

Tabla 1	Nombres y abreviaturas de empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe que participan en el estudio de sus áreas verdes urbanas, agrupadas por tipo de vegetación.	14
Tabla 2	Actividades realizadas en cada tiempo (trabajo en el invernadero).	17
Tabla 3	Valores objetivo de tensión hídrica del suelo para cada tratamiento en los dos períodos de riego controlado.	19
Tabla 4	Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre las distintas empresas con vegetación exótica del Parque Industrial Ramos Arizpe en las diferentes características del pasto.	26
Tabla 5	Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre el tipo de vegetación (exótica vs nativa) y el efecto de la empresa para cada tipo de vegetación del Parque Industrial Ramos Arizpe en las diferentes características del suelo.	28
Tabla 6	Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre pre-sequía y sequía, y el efecto de los tratamientos para cada tiempo en las diferentes características del suelo.	31
Tabla 7	Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre los tratamientos para el caso del WUE, en pre-sequía y sequía, y el efecto de los tratamientos para cada tiempo en la evapotranspiración y la biomasa seca total.	33

Lista de figuras

Figura 1	Diagrama del balance de agua y evapotranspiración. <i>Modificado de Novak, 2012.</i>	7
Figura 2	Servicios ecosistémicos de la vegetación en áreas urbanas. <i>Modificado de UrbanPioneers Ltd.</i>	10
Figura 3	Línea del tiempo del trabajo en el invernadero.	17
Figura 4	Distribución de mesocosmos en el invernadero para determinar el uso del agua de diferentes tipos de vegetación en áreas verdes urbanas en condiciones controladas.	18
Figura 5	Relación entre tensión hídrica del suelo registrada por sensores Whatchdog y porcentaje de humedad del suelo determinada por pérdida de peso.	20
Figura 6	Descripción de las áreas verdes con vegetación nativa en distintas empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe.	23
Figura 7	Descripción de las áreas verdes con vegetación exótica en distintas empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe.	23
Figura 8	Descripción del uso del espacio promedio destinado en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe.	24
Figura 9	Ejemplos de áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Izquierda-vegetación nativa, derecha-vegetación exótica.	25
Figura 10	Características del pasto (a) riego, (b) clorofila, (c) contenido relativo de agua de la planta y (d) área foliar específica en el pasto de las cuatro empresas con vegetación exótica del Parque Industrial Ramos Arizpe.	26
Figura 11	Características fisicoquímicas del suelo (a) humedad, (b) materia orgánica, (c) pH y (d) conductividad en suelos con distinto tipo de vegetación del Parque Industrial Ramos Arizpe.	28
Figura 12	Mesocosmos establecidos en el invernadero durante el período de mantenimiento.	29
Figura 13	Características fisicoquímicas del suelo (a) materia orgánica, (b) carbono orgánico, (c) pH y (d) conductividad en suelos en pre-sequía y sequía de los diferentes tratamientos, S-Suelo desnudo, P-Pasto, C-Cactáceas, C y A-Cactáceas y Arbusto.	30
Figura 14	Características hídricas de los mesocosmos (a) WUE, (b) biomasa seca total, (c) humedad, (d) evapotranspiración en pre-sequía y sequía de los diferentes tratamientos.	32
Figura 15	Mesocosmos durante el período de sequía.	33

Resumen

La vegetación urbana desempeña múltiples funciones, sin embargo, debe existir un balance entre los servicios ecosistémicos brindados y sus externalidades negativas. Existe poco conocimiento de la eficiencia en el uso del agua en las áreas verdes (AV) urbanas. Con el objetivo de comparar el gasto del agua de AV urbanas en zonas áridas con vegetación nativa y exótica se realizaron determinaciones con dos aproximaciones, mediciones en campo y experimentación en condiciones controladas (invernadero). Para la aproximación de campo se estudiaron cuatro AV con vegetación nativa y cuatro con exótica en el Parque Industrial Ramos Arizpe. Se caracterizó la estructura de las AV, y se determinó el verdor, contenido relativo de agua de las plantas, cantidad de agua del riego, y características fisicoquímicas del suelo, además de la aplicación de encuestas para conocer las prácticas de manejo de las AV. En condiciones controladas se comparó el efecto de la sequía sobre la vegetación exótica (pastos) y nativa (cactáceas, y cactáceas con arbustos). Se determinó la eficiencia del uso del agua, la tasa de evapotranspiración, y propiedades fisicoquímicas del suelo de los diferentes sistemas. En las AV del estudio en campo el 68% del espacio es destinado a vegetación, independientemente si son nativas o exóticas. En las AV con vegetación nativa el riego fue nulo o esporádico, mientras que, en las AV con vegetación exótica, tres de los sitios se apegaron a las recomendaciones máximas de riego para pastos (6-8 L/día por m²), y un sitio excedió dicha cantidad (13 L/día por m²), en todos los casos la vegetación presentó el mismo verdor y humedad del suelo, por lo que existe un uso excesivo de agua en el riego de las AV. En el caso de la simulación de sequía controlada en condiciones de invernadero se encontró que la vegetación exótica genera mayor biomasa y un menor uso eficiente del agua en comparación con la vegetación nativa ($p < 0.05$), como resultado de las altas tasas de evapotranspiración que mantiene. Los servicios ecosistémicos de las AV urbanas son de vital importancia, el costo económico y ecológico de las AV con vegetación poco adaptada a la aridez (i.e. pastos) es mucho mayor, cuando las AV no están brindando servicios recreativos, los costos del mantenimiento sobrepasan los beneficios brindados.

Astract

Urban vegetation performs multiple functions, however, there must be a balance between the ecosystem services provided and their negative externalities. There is a poor knowledge of the efficiency in the use of water in urban green areas (UGA). Our objective was comparing the use of water of UGA in arid zones with native and exotic vegetation, determinations were made from two approaches, field measurements and experimentation in controlled conditions (greenhouse). For the field approach, we studied four UGA with native vegetation and four with exotic vegetation in the Ramos Arizpe Industrial Park. Their structure was characterized, and determined the amount of chlorophyll, plant water content, amount of irrigation water, and soil physical characteristics, in addition to the application of surveys regarding the management practices. Under controlled conditions, it was compared the effect of drought on exotic (grass) and native vegetation (cacti, and cacti with shrubs). It was determined the water use efficiency, the evapotranspiration rates and soil properties at each system. In the field study, 68% of the space is dedicated to vegetation, regardless of the type of vegetation (i.e. native or exotic). The UGA with native vegetation showed non-irrigation or sporadic, while in the UGA with exotic vegetation, three were under the recommendation of maximum irrigation for grasses (6-8 L / day per m²), and one site exceeded this amount (13 L / day per m²), in all cases the vegetation presented the same amount of chlorophyll and soil moisture, so there is an excessive use of water in the UGA that exceeded the recommendation. In the case of controlled drought simulation under greenhouse conditions, it was found that exotic vegetation generates higher and less efficient use of water compared to native vegetation ($p < 0.05$), as a result of the high evapotranspiration rates. The ecosystem services of urban green areas have vital importance, the use of vegetation poorly adapted to aridity (e.g. grass), results in higher economic and ecological cost, when UGA are not providing recreational services, costs of maintenance exceed the benefits provided.



1. Introducción

La sustentabilidad se ha definido desde 1987 como "un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" [1]. Han pasado treinta años desde el planteamiento de desarrollo sustentable y casi mil millones de personas están desnutridas y no tienen acceso a agua potable, además 1.5 mil millones no tienen electricidad. Según cálculos actuales, para el año 2030 la demanda de agua superará la disponibilidad prevista de recursos hídricos disponibles por aproximadamente un 40 % [2].

Estimaciones recientes muestran que más del 50 % de la población humana vive en las ciudades, y para el 2050 se incrementará a un 75 %, la mayor parte de la urbanización ocurrirá en las ciudades de tamaño medio de los países en desarrollo. Este incremento en la urbanización podría representar un punto de inflexión en la vida del planeta [3].

Con el aumento de la urbanización, las perturbaciones humanas en el medio ambiente derivadas de la excavación de tierras a gran escala, las acumulaciones de suelo y los cambios en la micro-topografía, entre otros, alteran significativamente las funciones ecológicas e hidrológicas de los ecosistemas [4]. Si continúan las tendencias actuales de urbanización, la presión sobre los recursos naturales y los servicios de los ecosistemas tendrán consecuencias de gran alcance, por ejemplo, a través de la degradación de la tierra, escasez de agua, desembocando en una crisis alimentaria [2].

Aunado a lo anterior, los modelos de cambio climático generalmente coinciden en que en los próximos 50 años la temperatura de la superficie terrestre aumentará y los cambios en las precipitaciones provocarán sequías más severas y frecuentes[5]. Muchas regiones del mundo se ven cada vez más afectadas por la escasez de agua causada por el cambio climático y el crecimiento de la población, por lo que la totalidad de las prácticas actuales de riego deben ser evaluadas para desarrollar recomendaciones adecuadas para el ahorro de agua [6].

Por otra parte, las áreas verdes urbanas suelen describirse como los espacios públicos mejorados por la presencia de vegetación. Esta vegetación tiene importantes beneficios en el ambiente, capturando y secuestrando contaminantes transmitidos por el aire o por el agua, disminuyendo el efecto de la isla de calor urbano y en la sociedad, dado que promueve el desarrollo de la respuesta del sistema inmune, mejora la eficacia del ejercicio, reducen la ansiedad, la depresión, los niveles de cortisol y la presión arterial, también mejoran el estado de ánimo y la autoestima [7]. El desarrollo sustentable de dichas áreas verdes urbanas se logra tomando en cuenta consideraciones geográficas y climáticas particulares de cada región, para promover medidas que pueden reducir la absorción de calor urbano y promover el



almacenamiento de carbono del suelo, a la par de alterar lo menos posible los ciclos hidrológicos locales [8].

Las áreas verdes representan una contribución significativa para reducir los efectos del calentamiento global ya que alrededor del 70 % de la cobertura verde en las ciudades se encuentra en las áreas verdes residenciales [9].

En este sentido, actualmente existe poca comprensión de la cantidad de agua utilizada para mantener los paisajes urbanos, se calcula que un alto porcentaje de agua residencial es usada al aire libre, particularmente en climas áridos, los patios con césped, árboles de sombra y sistemas de riego por inundación o con rociadores son una opción de diseño popular que ha tenido un efecto duradero en el ecosistema urbano, aún en zonas áridas [10]. De ahí la importancia de una propuesta de áreas verdes urbanas sustentables, que promuevan un uso eficiente del agua destinada a su mantenimiento.

2. Antecedentes

2.1 Las zonas urbanas y su microclima

Las zonas urbanas son aquellas en las que la gente vive en altas densidades, y donde las estructuras e infraestructura construidas cubren gran parte de la superficie [11]. Urbanización también se entiende por ambientes construidos que contienen grandes áreas de superficies impermeables con alta inercia térmica (dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura [12]). Actualmente las zonas urbanas ya no son las agregaciones compactas que solían ser, sino más bien configuraciones similares a una red [13, 14].

Inherente a estas características, uno de los principales efectos negativos de la urbanización del paisaje es la modificación del microclima, derivado del incremento en la contaminación de diversas fuentes, la modificación de la escorrentía de las aguas pluviales, la destrucción de los hábitats naturales, entre otros [8, 15]. Como resultado, las ciudades exhiben su propio microclima y típicamente son más cálidas que las áreas rurales circundantes. Esta influencia de la meso-escala se conoce como el efecto *isla de calor urbano* y resulta en gran parte de la modificación de las propiedades superficiales que conducen a una mayor absorción de la radiación solar, una menor refrigeración convectiva y menores tasas de evaporación del agua [16].

Como resultado de la modificación climática en las ciudades, la emergencia de las hojas y los tiempos de floración son más tempranos, y las hojas caen más tarde que en los alrededores [17, 18]. Las islas de calor también afectan los comportamientos humanos, aumenta el uso de energía, debido a una mayor demanda de aire acondicionado, provocando a su vez un incremento de la temperatura al exterior, además de que el nivel de estrés térmico experimentado por los peatones en este entorno urbano se ve afectado por el intercambio de energía con su entorno [19]. En este sentido, se ha demostrado que el uso de la vegetación como cobertura superficial, tanto a nivel del suelo como en las paredes y techos, reduce drásticamente este estrés por calor, pues se reduce el intercambio de energía, particularmente en términos de radiación [19]. Además, esta vegetación ayuda a la captura de carbono y otras partículas suspendidas en el ambiente [20], y disminuye la producción de ozono a nivel del suelo [21, 22]. El ozono se crea a través de una reacción fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles y NOx (óxidos de nitrógeno) en presencia de la luz solar. Si hay precursores, las temperaturas más altas conducen a una mayor producción de ozono en las zonas urbanas con consecuencias directas para la salud humana [21, 23] y el crecimiento de las plantas [24].

2.2 El suelo urbano

Los suelos son la base de muchos procesos ecológicos, como el ciclo biogeoquímico, la distribución espacial de plantas, y la ubicación de la habitación y la actividad humanas [25]. Aunque muchos suelos en paisajes urbanos y urbanizados son modificados por la actividad humana, siguen brindando muchos de los servicios de soporte, al igual que los suelos no modificados [26-28]. En el paisaje urbano los suelos funcionan reteniendo y suministrando nutrientes, como medio de crecimiento y sustrato para la fauna y flora del suelo, y contribuyendo al ciclo hidrológico a través de la absorción, almacenamiento y suministro de agua [26].

Las características del suelo, sin embargo, son muy heterogéneas en el complejo urbano, formando mosaicos que incluyen suelos altamente perturbados pero también suelos relativamente no alterados que únicamente son modificados por factores ambientales urbanos indirectos [20, 29].

Los factores urbanos afectan directa e indirectamente las características químicas, físicas y biológicas del suelo. Los efectos directos incluyen alteraciones físicas, incorporación de materiales antrópicos y entierro o cobertura del suelo por relleno y superficies impermeables [29-31]. Las prácticas de manejo del suelo, por ejemplo, la fertilización y el riego, que se introducen después del desarrollo inicial, también se consideran efectos directos. Los efectos indirectos de la urbanización en los suelos implican cambios en el entorno abiótico y biótico, que pueden influir en el desarrollo de suelos intactos. Los efectos indirectos incluyen la isla de calor urbana [32, 33], la hidrofobicidad del suelo [30, 34], la introducción de especies exóticas de plantas y animales [35, 36], y la deposición atmosférica de contaminantes como N [37], metales pesados [38-40] y sustancias químicas orgánicas potencialmente tóxicas [41].

Una generalidad de los suelos urbanos son las concentraciones elevadas de metales pesados, a menudo con altas variaciones el uso de un sistema de riego inadecuado y una selección de vegetación deficiente ocasionarán efectos contraproducentes ambiental y económicamente [42, 43]. La mayoría de las fuentes de metales pesados en las ciudades se han asociado con entornos de carretera [44, 45], pinturas interior y exterior, incineradores de basura [46], emisiones industriales [47], y la presencia de desechos industriales [48]. A su vez, las modificaciones del suelo resultantes de la urbanización pueden modificar la dinámica de los nutrientes del suelo [49]. Los suelos urbanos se caracterizan por valores de pH generalmente más altos, textura más gruesa y mayor densidad aparente (relación entre la masa y el volumen global de las partículas del suelo [36]) en comparación con los suelos antes de ser urbanizados así mismo, su composición mineralógica se modifica, y se enriquece en carbonatos y

óxidos de hierro por la deposición de contaminantes en los mismos [37]. Los regímenes de humedad del suelo son un factor importante de la formación y función del suelo, y pueden ser modificados por los entornos urbanos. Los suelos alterados en las zonas urbanas suelen tener capacidades de infiltración limitadas debido a las superficies hidrofóbicas, la formación de costras y la compactación del suelo [30, 49].

La variación de propiedades del suelo es controlada no sólo por el grado de contaminación, sino también por la jardinería paisajística, cuando las calles y parques son plantados con especies exóticas se modifica el ciclo de nutrientes, la composición de los microorganismos del suelo y el régimen hídrico del sitio [37]. El uso de plantas nativas en las áreas verdes urbanas puede tener el beneficio adicional de mantener el suelo en condiciones más parecidas a las condiciones previas a la urbanización.

2.3 El agua en las zonas urbanas

La hidrología urbana es la disciplina científica del medio ambiente que tiene por objeto el estudio del agua y sus relaciones con las diferentes actividades humanas en las zonas urbanas. Trata particularmente las relaciones entre la gestión de las aguas de superficie y el desarrollo urbano [50].

Relativizando un presupuesto de agua a 100 unidades de precipitación y comparando áreas urbanas con áreas no urbanas, la evapotranspiración disminuye de 40% a 25%, la escorrentía superficial aumenta de 10% a 30% y las aguas subterráneas disminuyen de 50% a 32% [51].

Con el fin de lograr un desarrollo urbano sustentable es necesario contar con técnicas innovadoras de reconciliación agua-ciudad. Este proyecto se enfoca específicamente en el uso del agua en áreas verdes urbanas de zonas áridas.

2.3.1 El agua en las áreas verdes urbanas de zonas áridas

En las regiones áridas y semiáridas (200-400 mm de precipitación anual) el consumo de agua puede ser una limitación significativa para la implementación de un área verde [52].

El presupuesto de agua en estas regiones (tanto ecológico como económico) puede variar más severamente después de la urbanización, y la infraestructura debe ser más eficaz para restaurar el presupuesto de agua en un clima semiárido que en climas más húmedos [53]. En el suroeste de los Estados Unidos, donde el clima es semiárido, hasta el 70% del agua residencial se usa al aire libre, la combinación de aire seco y el exceso de irrigación conduce a tasas de evapotranspiración muy altas [54]. En este sentido, los programas de manejo y conservación de agua que se enfocan en el riego al aire libre son claves para reducir el consumo urbano de agua [54].

Si se tiene en cuenta que en las áreas verdes el principal objetivo no es la obtención de rendimientos, sino la supervivencia de la vegetación y su mantenimiento en unas condiciones estéticas aceptables, se hace necesaria la adopción de medidas que permitan reducir un excesivo consumo de agua hacia cantidades que permitan asegurar el mantenimiento de las plantas en estado óptimo.

El consumo de agua de las áreas verdes estará condicionado en gran medida por su diseño, ya que, por ejemplo, la mezcla de especies con necesidades hídricas diferentes en una misma zona, hace necesaria la aplicación de cantidades de agua por encima de las necesidades de algunas de dichas especies, lo que además de ocasionarles problemas fisiológicos, supondrá un consumo de agua superior al realmente necesario.

Un programa de riego eficiente se basa en las necesidades de la planta y las condiciones ambientales. Factores tales como la calidad del agua, el tipo de suelo, el clima local y el tipo de vegetación juegan un papel importante en el desarrollo de un programa de riego para la conservación del agua. La consideración más importante al desarrollar un programa de riego para un sitio en particular es la frecuencia y la cantidad de agua que se debe aplicar. Monitorear las condiciones climáticas, la tasa diaria de uso de agua y la disponibilidad de agua en el suelo es crítico para determinar la cantidad y el momento de riego apropiados [55].

El empleo de agua tratada para el riego de áreas verdes urbanas tiene como principal ventaja que no se comprometan los recursos hídricos destinados al suministro para el consumo humano [56]. Sin embargo, el uso de agua residual presenta algunos inconvenientes, como el elevado contenido en sales y elementos tóxicos, que, aunque en cantidades pequeñas, el proceso de acumulación derivado de los riegos continuos, incrementa su toxicidad y potencial riesgo a la salud. Además, las aguas residuales generalmente contienen agentes microbiológicos patógenos que pueden poner en riesgo la salud de la población. La mayor parte del agua tratada se aplica a través de riego por aspersión, en estas condiciones, puede ocurrir absorción foliar de sales, dando como resultado características de quemadura marginal de las hojas [55].

Asimismo, el uso de aguas tratadas supone una mayor inversión en los sistemas de distribución y riego para evitar la obturación de los mismos, debida a la presencia de sólidos en suspensión. A pesar de estos inconvenientes, el empleo de aguas residuales depuradas para riego de parques, jardines, campos de deporte, etc. supone una alternativa ante la escasa disponibilidad de agua en determinadas zonas y épocas del año [56].

2.3.2 Interacción agua-vegetación

El agua, principal componente de las plantas, es un elemento imprescindible para la vida de las mismas y constituye el principal medio de disolución y transporte de las sustancias nutritivas que existen en el suelo. Además, el agua es un elemento decisivo en los procesos de crecimiento y desarrollo de la vegetación, así como en los de regulación térmica, ya que les permite una correcta “refrigeración” para adaptarse a las distintas condiciones climáticas [56].

Del agua absorbida por las plantas una pequeña parte es retenida y utilizada en los procesos de fotosíntesis y crecimiento; el resto se pierde por transpiración. La cantidad de agua retenida por las plantas es casi insignificante frente a la transpirada, por lo que se puede considerar que el consumo de agua es equivalente a la transpiración. Además, desde el suelo y la superficie de la planta se produce evaporación a la atmósfera [56].

La evapotranspiración (Fig. 1) es el proceso mediante el cual la planta transpira el agua que absorbe desde el suelo hacia el aire a través de sus hojas en forma de vapor de agua. Para que el agua se convierta en vapor, se absorbe calor de la atmósfera, lo que da lugar a una disminución de la temperatura del aire, lo cual depende principalmente de la radiación, la presión de vapor, la temperatura y la velocidad del viento [57].

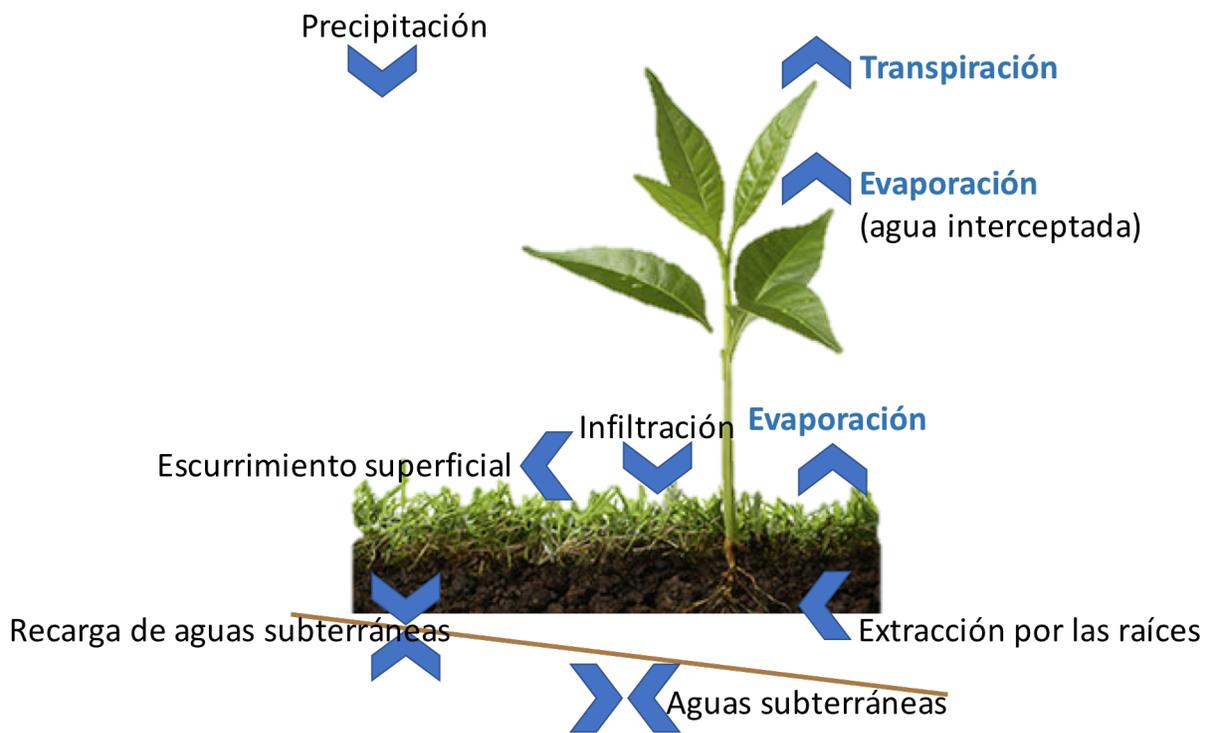


Figura 1. Diagrama del balance de agua y evapotranspiración.
Modificado de Novak, 2012 [58].

Para crecer con éxito, una planta debe lograr una economía de agua que la demanda de agua se equilibre con el suministro disponible. El problema es que la demanda de evaporación a la atmósfera es prácticamente continua, mientras que la lluvia ocurre solo ocasional e irregularmente. Para sobrevivir durante los períodos de sequía entre las lluvias, la planta depende de la disminución de las reservas de agua contenidas en los poros del suelo, las cuales disminuyen por la evaporación y el drenaje interno [59].

La determinación de la evapotranspiración es necesaria para maximizar el uso del agua, particularmente en regiones áridas y semiáridas donde las fuentes de agua son tan limitadas [60]. La evapotranspiración es uno de los parámetros más importantes en el modelo de superficie terrestre, porque vincula el balance energético y el balance hídrico de la superficie terrestre. Por ello, se han desarrollado esquemas de parametrización para la evapotranspiración, pero rara vez se considera la evaporación de las capas internas del suelo y mucho menos en áreas urbanas. En las regiones áridas y semiáridas, la evaporación interna del suelo es muy importante y ocupa una proporción considerable en la evaporación total del suelo [61].

Para conocer el estado hídrico de las plantas se pueden utilizar diversos indicadores tanto directos como indirectos. Un indicador del estado fisiológico de las plantas, e indirectamente de su estado hídrico, es la cantidad de clorofila que contienen [65].

2.4 Vegetación de áreas verdes urbanas en zonas áridas

De manera general, la configuración de las áreas verdes urbanas se caracteriza por la presencia de plantas exóticas a la región, al mismo tiempo que el porcentaje de plantas nativas disminuye, tendencia que va en aumento a nivel global [62]. El objetivo de utilizar plantas exóticas es lograr resultados “más estéticos” utilizando especies que atraen la atención de la población, y en algunos casos aumentar los niveles de vegetación en áreas difíciles; sin embargo, esta tendencia ha resultado en la diseminación de especies invasoras o intrusivas en otros ecosistemas [30].

Una propuesta en el caso de las áreas urbanas en regiones áridas, donde la escasez de agua limita severamente la sostenibilidad del paisaje, es que se convierta a “Xeriscaping”, un término desarrollado y protegido por el Departamento de Agua de Denver en 1981, que combina la palabra griega *xeros* que significa seco y paisajismo; se define como “un sistema que usa plantas nativas para minimizar el uso de agua y químicos” [20, 29]. La percepción de las plantas nativas de las regiones áridas es que se ven desaliñadas, esto puede evitarse mediante un diseño y selección de especies adecuada [20, 29], de ahí la

importancia de los estudios locales enfocados a la selección de plantas nativas que mejoren las prestaciones brindadas por las áreas verdes urbanas.

Las plantas que crecen bajo condiciones áridas pueden tener un conjunto de adaptaciones anatómicas, fisiológicas o fenológicas que les permiten escapar, evitar o tolerar el estrés hídrico [63]. Entre las características más visibles, están las siguientes: a) el desarrollo de estructuras de almacenamiento de agua (suculencia), b) una gruesa cutícula cerosa muy impermeable que recubre la mayor parte de las estructuras aéreas de la planta, c) la reducción del número de estomas por unidad de área, y su ocultamiento, d) la reducción del tamaño (microfilia) o la supresión de las hojas, e) el desarrollo de sistemas de redes complejas de raíces superficiales para aumentar el poder de absorción de agua y f) el desarrollo de mecanismos fotosintéticos alternos que reducen la pérdida de agua por transpiración [64].

El uso de plantas adaptadas a regiones áridas puede favorecer la preservación de estas plantas, siempre y cuando se colecten en el campo de manera sustentable o se propaguen de manera artificial. Sin embargo, muchas plantas utilizadas para este fin se colectan de las poblaciones naturales sin control alguno, esto es un factor que contribuye a agravar su estado de conservación, en específico de varias especies de cactáceas [64].

Existen tres diferentes tipos de fotosíntesis, la fotosíntesis C_3 es el tipo de fotosíntesis utilizada por las plantas que evolucionaron en zonas climáticas templadas a frías. También se extiende a muchas plantas de zonas climáticas mediterráneas. Funciona bien cuando la temperatura del aire está por debajo de los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. La fotosíntesis C_4 es utilizada por muchos pastos tropicales como la caña de azúcar, el maíz, el sorgo y los pastos de clima cálido. Tanto en la fotosíntesis C_3 como en la C_4 , la luz y el dióxido de carbono deben llegar a los cloroplastos al mismo tiempo. Esto significa que los estomas de estas plantas se abren durante el día, lo cual es una desventaja pues se pierde agua constantemente con los estomas abiertos [9, 66].

En cambio, las plantas que usan el tipo de fotosíntesis CAM (metabolismo del ácido crasuláceo) abren sus estomas por la noche, cuando el aire es más frío y más húmedo que durante el día, lo cual reduce a un mínimo la pérdida de agua a través de ellos. El dióxido de carbono que entra por la noche se convierte en ácidos que se almacenan hasta el día siguiente. Durante el día, el dióxido de carbono se libera de estos ácidos dentro de la planta y se convierte en azúcares. La CAM es utilizada por muchas suculentas y cactus que están magníficamente adaptados para crecer en ambientes estacionalmente muy secos donde las temperaturas diurnas son altas y las temperaturas nocturnas a menudo muy bajas. Los

cactus y las suculentas son, por lo tanto, excelentes plantas para la jardinería sin necesidad de utilizar agua adicional en el caso de las zonas áridas y/o semiáridas [9, 66].

2.5 Servicios ecosistémicos

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales define los servicios ambientales o servicios ecosistémicos como los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas o biomas ponen a disposición de la sociedad de manera natural y, además de influir directamente en el mantenimiento de la vida, generan beneficios y bienestar para las personas y las comunidades; entre otros elementos asociados con lo anterior, destacan los bosques, selvas, desierto, sabana y tundra [67].

Los servicios ecosistémicos urbanos comenzaron a aparecer en la literatura académica a mediados de los 90's, en temas relacionados con la ecología urbana, la planificación del paisaje, la gestión urbana, la silvicultura urbana, la psicología ambiental y la salud ambiental [68]. Aunque se ha escrito mucho sobre el desarrollo urbano sostenible, el componente de la ecología urbana ha sido ampliamente ignorado. Por consiguiente, el desarrollo sustentable urbano es poco comprendido por los planificadores y diseñadores, los desarrolladores comunitarios y los planificadores sociales, e incluso los académicos y consultores [69].

Adicionalmente al control del microclima, las áreas verdes urbanas brindan diversos servicios al ecosistema y a la población en general, como la remoción de contaminantes y partículas suspendidas, retención del suelo, reducción de ruido, además de brindar confort por su atractivo estético y recreacional (Fig. 2) [70].

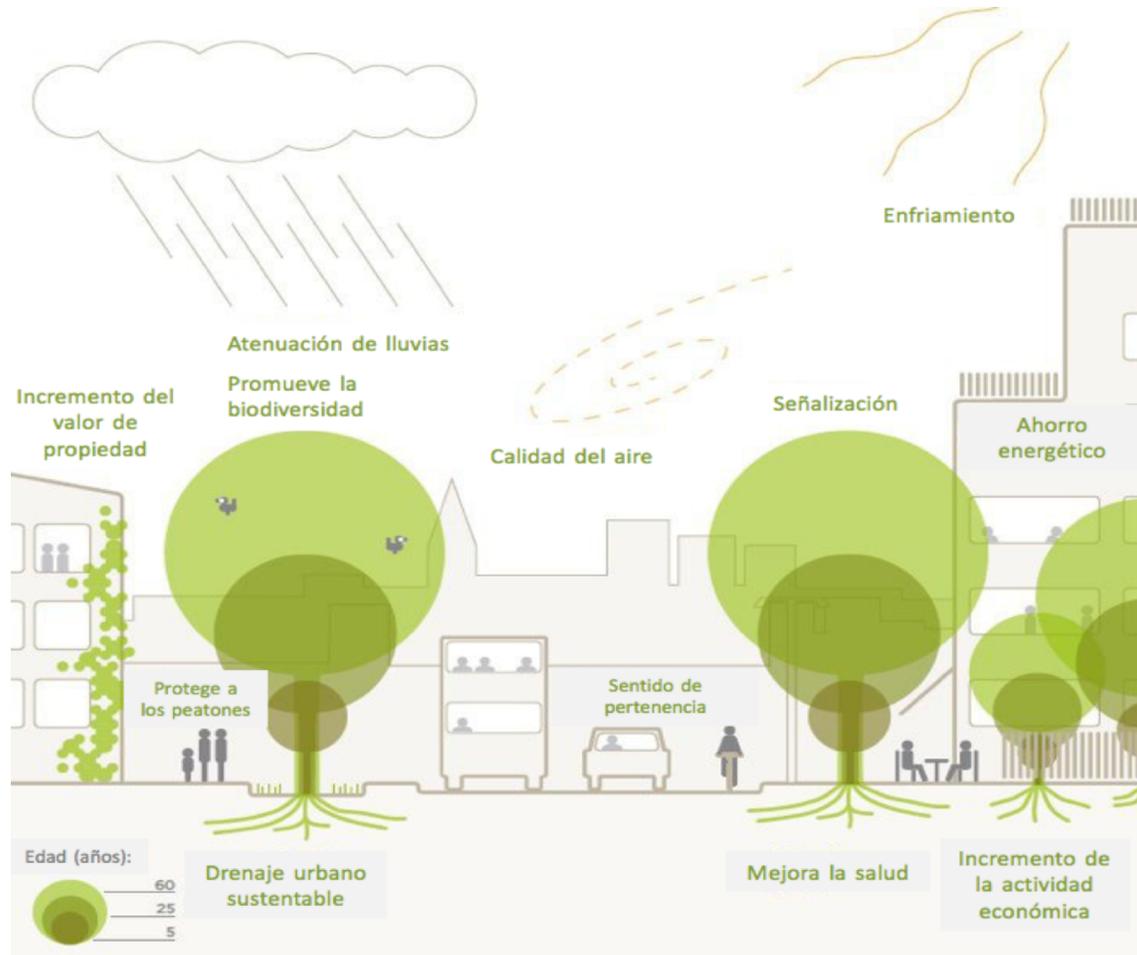


Figura 2. Servicios ecosistémicos de la vegetación en áreas urbanas.
Modificado de UrbanPioneers Ltd.

Típicamente, la sociedad tiene áreas verdes puramente por su valor estético. Los centros urbanos, los parques y las residencias privadas se adornan con plantas para mejorar el aspecto y el espacio de relleno, sin preocuparse por las funciones que los especímenes vegetales pueden proporcionar en términos de servicios ambientales. En el escenario de cambio global en el que se encuentra el planeta, es importante que las plantas desempeñen funciones específicas en las zonas urbanas tales como: la reducción de la insolación, el enfriamiento por evapotranspiración, el control del polvo y del viento, así como contribuir con diferentes usos etnobotánicos [17].

Sin embargo, la magnitud de estos servicios depende directamente de la estructura y composición vegetal de dichas áreas verdes. En la mayoría de los casos, el uso de especies exóticas poco adaptadas a las condiciones locales, genera un mayor costo, tanto económico como ecológico por mantenimiento, sobrepasando los beneficios que éstas proporcionan. Por lo tanto, debe existir un balance adecuado



entre los servicios ecosistémicos que proporcionan las áreas verdes urbanas y los costos de su mantenimiento.

Por lo tanto, el diseño de áreas verdes sustentables con plantas adaptadas a la región potencialmente provee servicios ambientales de importancia, con un menor costo económico, y sin comprometer los servicios brindados a la sociedad.



3. Justificación

Actualmente se busca que las áreas verdes aporten beneficios únicamente estéticos, sin embargo, la vegetación debe ser integrada al entorno urbano para disfrutar de los servicios ambientales, sociales y económicos que nos puede brindar. Al mismo tiempo se debe considerar una adecuada selección de vegetación en las áreas verdes urbanas, teniendo en cuenta los recursos hídricos disponibles, el tipo de suelo, el clima, los requerimientos de las plantas, entre otros; esto con el objetivo de lograr áreas verdes sustentables.

Para ello, es necesario contar con estudios que nos ayuden a entender el funcionamiento de dichas áreas verdes urbanas, tales como cambios microambientales (humedad y temperatura del suelo), propiedades del suelo, y el nivel de eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas. Con esta información se puede contribuir al diseño de las áreas verdes urbanas sustentables como estrategia de adaptación al cambio global. Específicamente las zonas áridas se caracterizan por la carencia de recursos hídricos, debido a esto, el agua debe utilizarse estratégicamente. De ahí que, este estudio se realizó en una región árida, en el municipio de Ramos Arizpe, Coahuila.

4. Hipótesis

El uso de plantas nativas, adaptadas a las condiciones climáticas propias de zonas áridas en las áreas verdes, conllevará a un uso más eficiente del agua, en comparación con plantas exóticas ornamentales como los pastos.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Comparar el uso del agua por parte de la vegetación de áreas verdes urbanas en zonas áridas tanto con plantas nativas como exóticas.

5.2 Objetivos particulares

- Caracterización de la vegetación de áreas verdes urbanas en el Parque Industrial Ramos Arizpe, especificando el uso del espacio para uso peatonal y vegetación.
- Estimar el uso de agua en áreas verdes urbanas en el Parque Industrial Ramos Arizpe comparando vegetación nativa y exótica de zonas áridas.
- Determinar la tasa de evapotranspiración y la eficiencia del uso de agua comparando vegetación exótica y nativa de zonas áridas en condiciones controladas
- Comparar el efecto de la sequía en la evapotranspiración y supervivencia de la vegetación exótica y nativa.

6. Metodología Científica

El trabajo experimental se realizó mediante dos aproximaciones: campo (áreas verdes urbanas del Parque Industrial Ramos Arizpe) e invernadero (mesocosmos en condiciones controladas).

6.1 Determinación del uso de agua y estatus hídrico de áreas verdes urbanas del Parque Industrial Ramos Arizpe

El Parque Industrial Ramos Arizpe está situado en el municipio de Ramos Arizpe, Coahuila, dentro del Desierto Chihuahuense, esta subregión se extiende desde el sur de San Luis Potosí hasta el sur de Texas, Nuevo México y sureste de Arizona, en particular Ramos Arizpe es considerada como una región árida debido a las bajas precipitaciones [71].

6.1.1 Selección de empresas

Se solicitó la participación de varias empresas dentro del Parque Industrial Ramos Arizpe teniendo en cuenta el tamaño aproximado de sus áreas verdes y el tipo de vegetación presente en las mismas; esta información se obtuvo utilizando la herramienta Google Earth. De acuerdo a su disponibilidad, cuatro empresas por tipo de vegetación fueron las participantes en este proyecto (Tabla 1). En cada empresa se aplicó una encuesta a los responsables del mantenimiento de las AV con el objetivo de conocer las prácticas habituales en cada caso. Los temas incluidos en dichas encuestas fueron: mantenimiento, riego, horas hombre invertidas, herramientas utilizadas, aplicación de fertilizantes y pesticidas, así como la modificación de suelo.

Tabla 1. Nombres y abreviaturas de empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe que participan en el estudio de sus áreas verdes urbanas, agrupadas por tipo de vegetación.

		Nombre	Abreviatura	Áreas verdes (m ²)
Tipo de vegetación	Nativa	ZF	ZF	4659.20
		Cinvestav	CNV-N	1480.20
		Arysta Lifescience	ARS	3998.00
		Inductotherm	IND	619.00
	Exótica	Universidad Tecnológica de Coahuila	UTC	19883.00
		Cinvestav	CNV-E	911.10
		Yanfeng	YF	539.30
		PAT	PAT	108.00

6.1.2 Determinación de la cantidad de riego

Se determinaron tres puntos de muestreo por empresa, tomando como criterios de selección su representatividad y accesibilidad, en los cuales se colocó una trampa para colecta de agua de lluvia/riego durante una semana, con lo cual se determinó la cantidad de agua utilizada por cada área verde. Posteriormente se midió el volumen colectado en cada trampa, se realizó el promedio de los tres valores y se extrapoló al área total de cada área verde.

6.1.3 Análisis de suelo

Adicionalmente, en cada punto de muestreo se colectó una muestra de suelo para la determinación de sus propiedades fisicoquímicas [72]:

- Humedad del suelo: Se determinó por la diferencia entre el peso de la muestra húmeda y el peso de la misma muestra secada en la estufa, sobre la base del peso seco. El resultado se expresa en términos de porcentaje en peso de suelo seco.
- pH del suelo: Se midió en una relación 1:2.5 suelo-agua, utilizando la técnica potenciométrica.
- Conductividad eléctrica del suelo: Se midió en una relación 1:5 suelo-agua, utilizando la técnica conductimétrica.
- Contenido de materia orgánica del suelo: Se determinó por el método de calcinación a 400° C durante 4 horas. La diferencia entre el peso de la muestra secada al aire y el peso de la misma muestra calcinada, sobre la base del peso de la muestra calcinada. El resultado se expresa en términos de porcentaje.

6.1.4 Análisis de vegetación

Adicionalmente, en el caso de las áreas verdes con vegetación exótica se determinaron las siguientes características fisiológicas de los pastos:

- Cantidad de clorofila presente en los pastos, por medio del medidor de clorofila SPAD 502, que mide el contenido de clorofila o “verdor” de las plantas. Este es un método no invasivo, se coloca el medidor sobre el tejido de la hoja y se obtiene una lectura del contenido indexado de clorofila (0-99.9); se tomaron cinco mediciones de cada punto de muestreo. El resultado se expresa en unidades SPAD.
- Área foliar específica: El área de las hojas se determinó con el software Compu eye [73]. El resultado se expresa en cm^2/g (peso seco de las hojas).
- Contenido relativo de agua de la planta: Se determinó extrayendo secciones circulares de un tamaño homogéneo de las hojas para posteriormente secarlos en una estufa, es la diferencia



entre el peso de la muestra húmeda y el peso de la muestra seca, sobre la base del peso seco. El resultado se expresa en términos de porcentaje [74].

6.1.5 Análisis de datos

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante análisis de la varianza (ANOVA) de una vía, teniendo como factor el tipo de vegetación y ANOVA de una vía para analizar las diferencias entre las empresas dentro de cada tipo de vegetación ($P < 0.05$). Al encontrarse un efecto significativo del factor se realizó un análisis post-hoc de comparación de medias utilizando la prueba de Tukey. En todos los casos se cumplió con el supuesto de normalidad de los residuos. Se utilizó el software Statistica V10.0 para los análisis estadísticos y se graficó con SigmaPlot 12.0.

6.2 Determinación de la evapotranspiración y el uso de agua de áreas verdes urbanas en condiciones controladas

El invernadero en el que se realizó este proyecto está ubicado en las instalaciones del Cinvestav Unidad Saltillo dentro del Parque Industrial de Ramos Arizpe, Coahuila. El trabajo realizado en el invernadero tuvo una duración de alrededor de once meses, en la Figura 3 se presenta una línea del tiempo en la que se indican los momentos de mayor relevancia, así como el tipo de riego administrado y en la Tabla 2 se describen las actividades principales realizadas en cada tiempo.

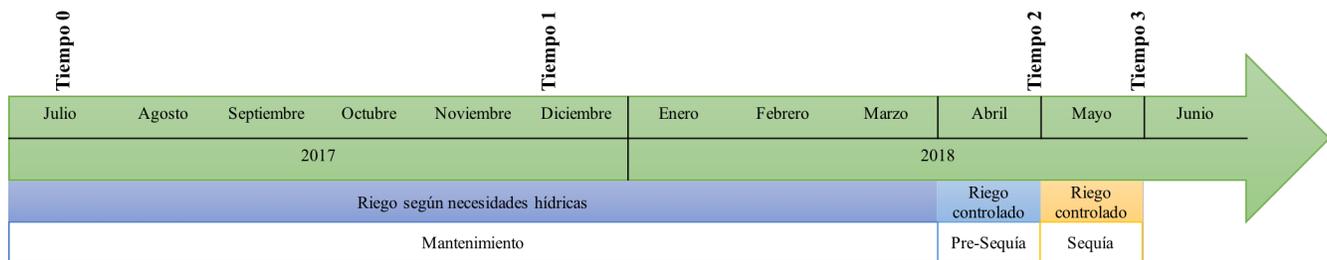


Figura 3. Línea del tiempo del trabajo en el invernadero.

Tabla 2. Actividades realizadas en cada tiempo (trabajo en el invernadero).

No. Tiempo	Actividades
Tiempo 0	Establecimiento de mesocosmos, medición del diámetro de cactáceas y arbustos, análisis de suelo.
Tiempo 1	Medición del diámetro de cactáceas, altura del pasto y arbustos.
Tiempo 2	1er cosecha, determinación de humedad de la vegetación, medición del diámetro de las cactáceas, altura del pasto y arbustos, análisis de suelo.
Tiempo 3	2a cosecha, determinación de humedad de la vegetación, medición del diámetro de las cactáceas, altura del pasto y arbustos, análisis de suelo.

6.2.1 Tiempo 0: Establecimiento de los mesocosmos

Se establecieron mesocosmos ya que son sistemas autosuficientes, físicamente confinados, que pueden incluir varios niveles tróficos y que permiten mantener en un diseño experimental las características ecológicas idénticas a las del sistema natural, su productividad está determinada por la carga inicial y por el nivel de aportes exógenos de nutrientes [75]. En este caso se dispusieron en cajones de madera (70 cm x 55 cm, largo por ancho y 6 cm profundidad) forrados de poliuretano transparente.

Se establecieron cuatro tratamientos con tres réplicas cada uno en un diseño factorial (a excepción del control con dos réplicas). Tratamiento 1: suelo desnudo (control). Tratamiento 2: vegetación exótica, pasto (15 g de semillas). Y dos tratamientos de vegetación nativa: Tratamiento 3: cactáceas (11

individuos), y Tratamiento 4: cactáceas (11 individuos), arbusto (1 individuo). En los tratamientos de vegetación nativa (3 y 4) se utilizó roca volcánica roja (comúnmente llamada tepetate) como acolchado de los suelos, comúnmente utilizado en áreas verdes con vegetación nativa con la intención de abrigar el suelo y protegerlo de las heladas en invierno y la evaporación de agua en verano. En total se prepararon 11 mesocosmos (Fig. 4).

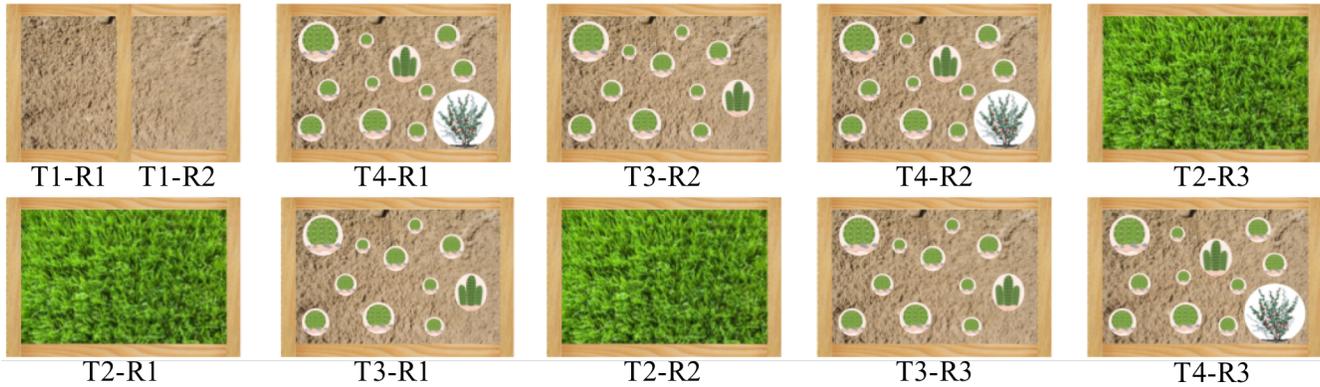


Figura 4. Distribución de mesocosmos en el invernadero para determinar el uso del agua de diferentes tipos de vegetación en áreas verdes urbanas en condiciones controladas (T-número de tratamiento, R-número de réplica).

El suelo empleado se obtuvo del Cinvestav, en el mes de mayo de 2017, se colectó, tamizó y almacenó para su posterior utilización. 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 (tiempo 0, Fig. 3). Las cactáceas utilizadas fueron suministradas por el Dr. Alfredo Flores, investigador del Cinvestav Saltillo. Las cactáceas empleadas fueron globulares, de géneros tales como: *Echinocactus*, *Echinomastus*, *Ancistrocactus*, y *Gymnocactus*. Los arbustos utilizados fueron identificados como *Leucophyllum frutescens* (comúnmente conocido como cenizo), nativo del norte de México y el sudoeste de Estados Unidos, y fueron adquiridos en el vivero La Palma en la Ciudad de Saltillo. Las semillas del pasto fueron *Cynodon dactylon* (pasto bermuda) comúnmente utilizado en las áreas verdes de la región, por su alta resistencia a la sequía en comparación con otras especies de pasto [76].

Dichos mesocosmos se colocaron de manera contigua pero aleatoria dentro del invernadero (Fig. 4). Se realizó una medición inicial (tiempo 0, Fig. 3) del tamaño de los individuos establecidos; el diámetro de las cactáceas y la altura de los arbustos; así como de las propiedades fisicoquímicas del suelo descritas en la sección 6.1.3 (pH de suelo en solución con agua 1:2.5, conductividad, contenido de agua del suelo a saturación, cantidad de materia orgánica por calcinación a 400 °C).

6.2.2 Tiempo 1: Mantenimiento de los mesocosmos

Posterior al establecimiento de los mesocosmos siguió el mantenimiento de los mismos el cual tuvo una duración de nueve meses (julio 2017-marzo 2018), durante este período el riego fue libre y constante de acuerdo a las necesidades hídricas de cada tratamiento con agua de la región [56]. En el mes de diciembre 2018 (Tiempo 1, Fig. 3) se midieron los individuos establecidos, el diámetro de las cactáceas y la altura del pasto y arbustos.

6.2.3 Tiempo 2 y 3: Riego controlado

En abril de 2018 (tiempo 2, Fig. 3) se inició el riego controlado. La cantidad de riego se determinó de acuerdo a los niveles de humedad requeridos por cada tipo de vegetación [55, 74]. En el tiempo 2 (pre-sequía) el objetivo fue regar la cantidad adecuada para cada tratamiento, mientras que el tiempo 3 (sequía) tuvo por objetivo lograr una sequía controlada (Tabla 3).

Para ello, se instalaron sensores de humedad WatchDog 1400 Data Logger (Spectrum Technologies, Inc.), en un mesocosmo de cada tratamiento y considerando que capacidad de campo del suelo utilizado presentó una humedad de 50 KPa y tomando en cuenta los requerimientos hídricos de cada tratamiento se determinaron valores objetivo de tensión hídrica del suelo para cada tratamiento (Tabla 3). Al final de cada período se realizó una cosecha, en la cual se extrajeron dos cactáceas de cada mesocosmos de los tratamientos con vegetación nativa (cactáceas y cactáceas-arbusto), así mismo se tomaron muestras de los arbustos y se colectó 1 cm² de pasto de los mesocosmos del con vegetación exótica. De estas muestras vegetales se determinó la cantidad de agua contenida en las plantas, por pérdida de peso al secarlas en un horno a 105°C durante 72 horas.

Tabla 3. Valores objetivo de tensión hídrica del suelo para cada tratamiento en los dos períodos de riego controlado.

Tratamiento	Pre-Sequía			Sequía		
	Tensión hídrica (Kpa)	Humedad (%)	Riego (ml/cm ²)·día	Tensión hídrica (Kpa)	Humedad (%)	Riego (ml/cm ²)·día
Suelo desnudo	45	17.32	0.190	85	11.22	0.095
Pasto	55	15.98	0.208	95	9.86	0.117
Cactáceas	140	5.97	0.104	185	3.08	0.058
Cactáceas y Arbusto	100	9.49	0.117	150	5.38	0.065

Los sensores utilizados miden la tensión hídrica del suelo, aplicando una corriente para obtener un valor de resistencia que es convertido a tensión (KPa), valores menores de tensión significan una mayor humedad del suelo y valores más altos de tensión una menor humedad. Con el objetivo de expresar los

valores obtenidos por los sensores en porcentaje de humedad, se obtuvo una curva de calibración con un ajuste de los valores de seis muestras con tensión hídrica (KPa) y porcentaje de humedad (%) conocidos, determinado por pérdida de peso hasta peso constante, en un horno a 105 °C. La Fig. 5 presenta el ajuste lo tensión hídrica y porcentaje de humedad con una ecuación logarítmica, así como el ajuste de la misma.

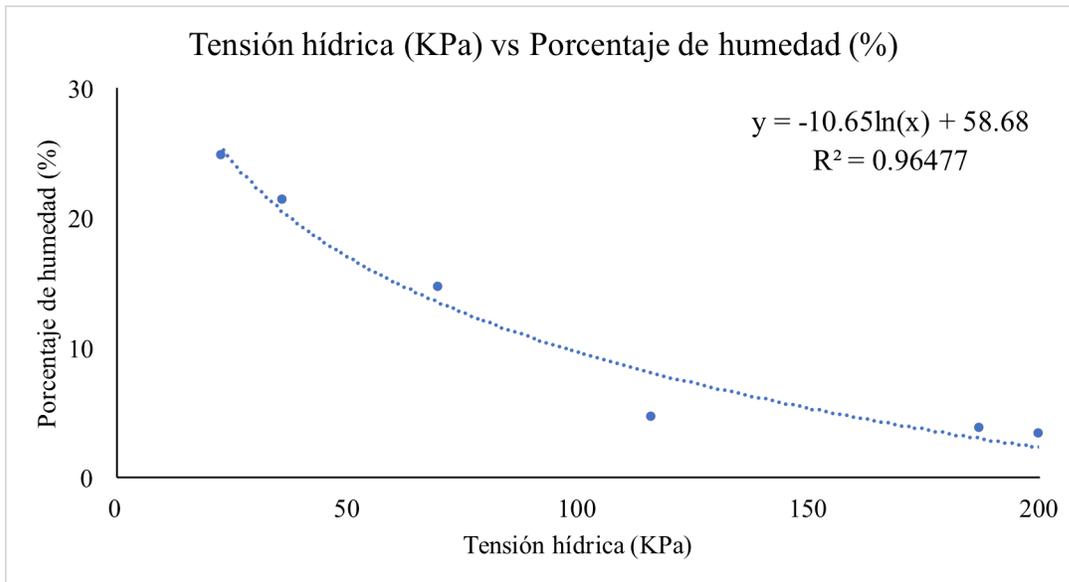


Figura 5. Relación entre tensión hídrica del suelo registrada por sensores Whatchdog y porcentaje de humedad del suelo determinada por pérdida de peso.

6.2.4 Determinación del Uso Eficiente del Agua

Para determinar el uso eficiente de agua de las plantas utilizadas en los mesocosmos se ajustó la cantidad de agua y la materia seca de las plantas colectadas en el tiempo 2 (pre-sequía), con las dimensiones de las mismas en el tiempo 1 (mantenimiento) y 2 (pre-sequía), para posteriormente extrapolar los valores al resto del material vegetal del mesocosmos, y poder calcular el agua total utilizada para el incremento de biomasa de cada mesocosmos. En el caso de las cactáceas la cantidad de agua y de materia seca se correlacionaron con el diámetro de los individuos, el pasto con la altura y los cenizos con la suma de las longitudes de sus ramas.

La tasa relativa de crecimiento (TRC) se calculó en un período de tiempo de cinco meses para cada mesocosmos, mediante la siguiente ecuación [77]:

$$TRC = \frac{\ln (PS_2 - PS_1)}{t}$$

TRC: Tasa relativa de crecimiento (mg/día)

PS₂: Peso seco en el tiempo 2 (mg)

PS₁: Peso seco en el tiempo 1 (mg)

t: Período de tiempo (días)

El uso eficiente del agua (Water-use efficiency, WUE) se define como la cantidad de material vegetal seco producido en un período de tiempo (TRC) por unidad de agua usada. Se calculó el WUE de cada mesocosmos mediante la siguiente ecuación [59]:

$$WUE=TRC/P$$

WUE: Uso eficiente del agua (mg/día)/ml

TRC: Tasa relativa de crecimiento (mg/día)

P: Precipitación y/o riego (ml en el período)

6.2.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración de los mesocosmos se calculó en los dos períodos de riego controlado (pre-sequía y sequía), mediante la ecuación de equilibrio suelo-agua [59]:

$$E_t=(P-\Delta W_s-\Delta W_v)/t$$

P= Precipitación y/o riego de un período de tiempo (ml)

ΔW_s = Cambio del agua en el suelo (ml)

ΔW_v = Cambio del agua en la vegetación (ml)

t: Período de tiempo (días)

6.2.6 Análisis de datos

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante análisis de la varianza (ANOVA factorial), teniendo como factor el tipo de vegetación y los períodos de riego controlado (pre-sequía y sequía) y ANOVA de una vía para analizar las diferencias entre el WUE de cada tipo de vegetación ($P<0.05$). Al encontrarse un efecto significativo se realizó un análisis pos hoc de comparación de medias utilizando la prueba de Tukey. En todos los casos se cumplió con el supuesto de normalidad de los residuos. Se utilizó el software Statistica V10.0 para los análisis estadísticos y se graficó con SigmaPlot 12.0.

7. Resultados

7.1 Determinación del uso de agua y estatus hídrico de áreas verdes urbanas del Parque Industrial Ramos Arizpe

En la aproximación de campo se realizó la descripción de las áreas verdes por empresa del Parque Industrial Ramos Arizpe (Fig. 6 y 7) y en promedio para cada tipo de vegetación dentro del parque (Fig. 8). Como se observa en la Figura 8 las empresas con vegetación nativa tienen en promedio 68% del área verde destinada a vegetación, del cual 10% de dicha vegetación son cactáceas, el 58% restante está compuesto por otras especies de regiones áridas, principalmente: ocotillo (*Fouquieria splendens*), cenizo (*Leucophyllum frutescens*), palma yuca (*Yucca filifera*), candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), lechuguilla (*Agave lechuguilla*), huizache (*Acacia farnesiana*), mezquite (*Prosopis velutina*), entre otros. Dos de las empresas (ZF e IND), destinan un mayor porcentaje a usos peatonales (aceras, andadores), en comparación con el espacio destinado a vegetación (58% en ambos casos; Fig. 6).

Asimismo, en las áreas verdes con vegetación exótica (Fig. 8) el pasto tiene un porcentaje de cobertura promedio del 61%. La UTC presenta el porcentaje más alto de cobertura de pasto (99%), YF presenta la menor cobertura (40%; Fig. 7).

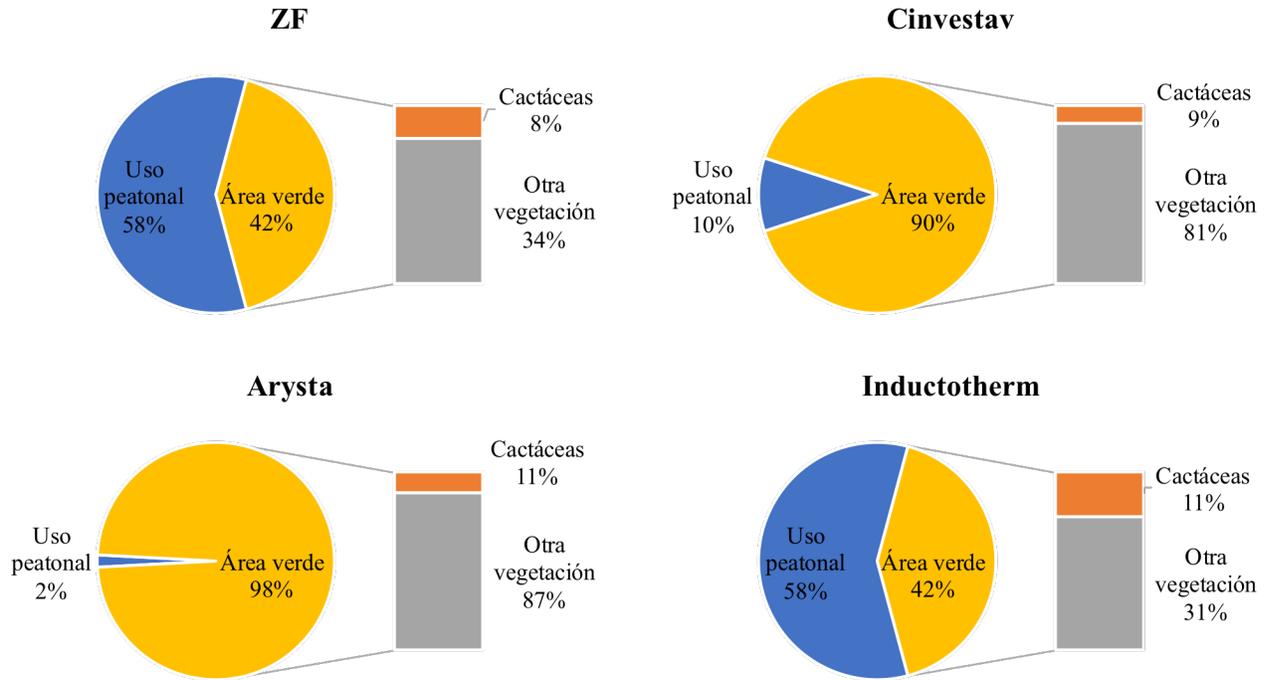


Figura 6. Descripción de las áreas verdes con vegetación nativa en distintas empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe. Se señala el uso del espacio (peatonal -azul, área verde con cactáceas -naranja o con otra vegetación -gris) en porcentaje estimado (%).

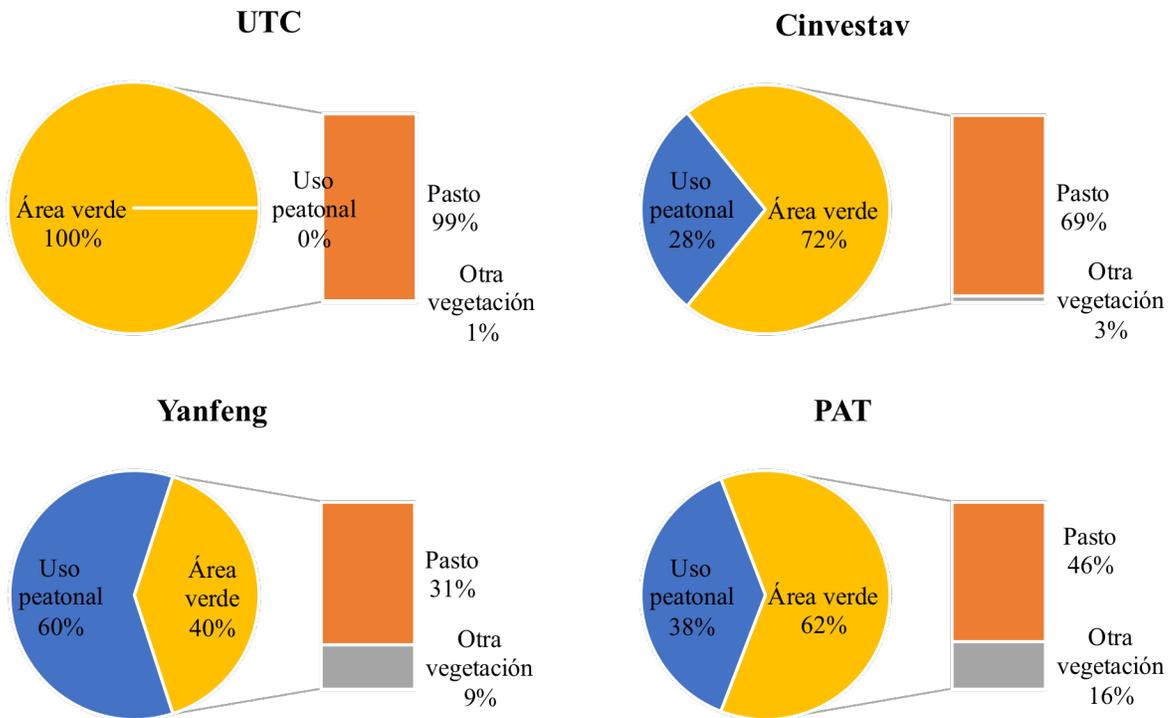


Figura 7. Descripción de las áreas verdes con vegetación exótica en distintas empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe. Se señala el uso del espacio (peatonal -azul, área verde con pasto -naranja o con otra vegetación -gris) en porcentaje estimado (%).

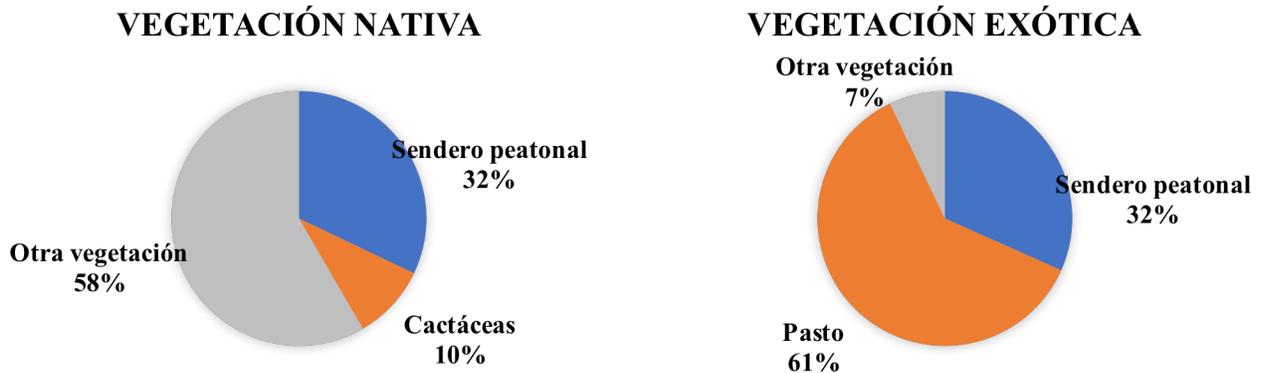


Figura 8. Descripción del uso del espacio promedio destinado en las áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Se señala el uso del espacio en porcentaje estimado (peatonal -azul, pasto o cactáceas -naranja y otro tipo de vegetación -gris).

De acuerdo a las encuestas aplicadas las empresas con vegetación nativa realizan mantenimientos elementales a sus áreas verdes, es decir, las limpian, eliminan la maleza periódicamente, podan árboles y arbustos, en caso de extrema sequía se realizan riegos de auxilio, pues a pesar de que estas especies son de climas áridos y semiáridos y por naturaleza requieren poca agua, el proporcionar riegos en momentos críticos mejora su apariencia y desarrollo, también monitorean la ausencia de plagas y enfermedades. La única modificación que le dan al suelo es la adición de roca tepetate como acolchado de los suelos, no obstante IND realizó un mejoramiento adicional el cual consistió en la adición arenas con el objetivo de mejorar la permeabilidad y retención del agua. Así mismo las herramientas necesarias para el mantenimiento de las áreas verdes con vegetación nativa son: guantes, pinzas, tijeras de poda y ocasionalmente mangueras. Adicionalmente las horas hombre promedio invertidas semanalmente por cada metro cuadrado en este tipo de áreas verdes son 0.01.

Por el contrario, las empresas con vegetación exótica destinan numerosos recursos: hídricos, energéticos, humanos y económicos para el mantenimiento de sus AV. La cantidad de recursos hídricos es una diferencia notoria, sin embargo, no es la única, las empresas que cuentan con áreas verdes con vegetación exótica además de realizar el mantenimiento elemental que se describió anteriormente realizan actividades adicionales para lograr la conservación de sus áreas verdes. Por ejemplo, de inicio para sembrar las áreas verdes efectúan mejoramientos del suelo adicionando suelo para jardín y humus, realizan poda con mayor frecuencia, pues debido a las características metabólicas de estas especies, generan mayor cantidad de biomasa en menor tiempo, además utilizan fertilizantes y pesticidas habitualmente. Así mismo las herramientas necesarias para el mantenimiento de las áreas verdes con vegetación nativa son: guantes, pinzas, tijeras de poda, mangueras o sistemas de riego por aspersión, carretillas, podadoras, rastrillos de jardinería, a esto se debe agregar el combustible de las podadoras.

Adicionalmente las horas hombre promedio invertidas semanalmente por cada metro cuadrado en este tipo de áreas verdes son 0.06.



Figura 9. Ejemplos de áreas verdes del Parque Industrial Ramos Arizpe. Izquierda-vegetación nativa, derecha-vegetación exótica.

El riego aplicado en las empresas con vegetación nativa fue nulo, por ello se presentan los datos correspondientes al riego en empresas con vegetación exótica (Fig. 9a). En este sentido, la UTC presentó significativamente mayor riego que el resto de empresas; mientras que el CNV-E presentó significativamente el menor riego (Fig. 9a).

La Figura 9b muestra el contenido relativo de agua (CRA) en los pastos de las diferentes empresas. Como se puede observar, el CNV-E presentó significativamente mayor CRA en comparación con YF y PAT; mientras que PAT presentó significativamente menor CRA que el resto de empresas (Fig. 9b). En cuanto al área foliar específica (SLA, por sus siglas en inglés) de los pastos, la UTC presentó significativamente mayor SLA en comparación con YF y CNV; YF presentó significativamente menor SLA que el resto de empresas (Fig. 9c).

La cantidad de clorofila en los pastos no presentó diferencias significativas entre las empresas (Fig. 9d).

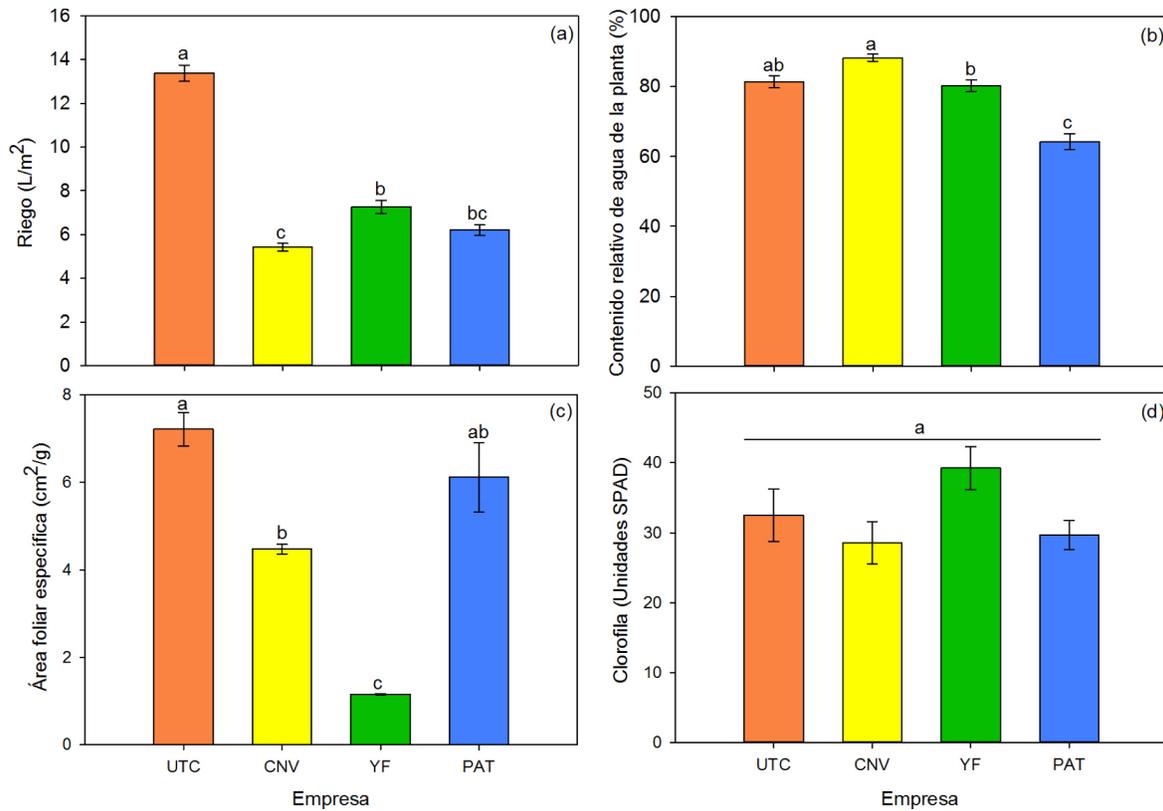


Figura 10. Características del pasto (a) riego, (b) clorofila, (c) contenido relativo de agua de la planta y (d) área foliar específica en el pasto de las cuatro empresas con vegetación exótica del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las barras representan los valores promedio con su respectivo error estándar. Las letras minúsculas representan diferencias significativas entre las empresas de acuerdo con la comparación post-hoc de la prueba de Tukey del ANOVA de una vía ($p < 0.05$) (ver tabla 4).

Tabla 4. Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre las distintas empresas con vegetación exótica del Parque Industrial Ramos Arizpe en las diferentes características del pasto. Los efectos significativos se observan en negritas.

	Vegetación Exótica	
	Empresa	
	F	P
Riego	167.31	<0.001
Clorofila	2.48	0.071
% CRA	34.01	<0.001
Área foliar específica	35.47	<0.001

En cuanto a la caracterización del suelo de las diferentes empresas ésta se puede observar en la figura 10. De acuerdo a los resultados del ANOVA (Tabla 5), el porcentaje de humedad del suelo fue significativamente mayor en las empresas con vegetación exótica (pastos), en comparación con las

empresas con vegetación nativa (Fig. 10a). Por el contrario, no se encontraron diferencias significativas entre las empresas dentro de cada tipo de vegetación (Fig. 10a). De la misma manera, el porcentaje de materia orgánica fue significativamente mayor en las empresas con vegetación exótica (pastos), en comparación con las empresas con vegetación nativa (Fig. 10b). Tampoco se encontraron diferencias significativas entre las empresas dentro de cada tipo de vegetación (Fig. 10b). Por otra parte, los suelos de las áreas verdes en el Parque Industrial no presentaron diferencias significativas en el pH y la conductividad de acuerdo al tipo de vegetación de las empresas (Fig. 10c y 8d). Sin embargo, tanto en pH como en la conductividad se encontraron diferencias significativas entre las empresas con vegetación nativa (Fig. 10c y 10d). Todos los suelos analizados presentaron un pH alcalino y son del tipo sódico, a excepción de la empresa IND, este suelo fue del tipo salino-sódico.

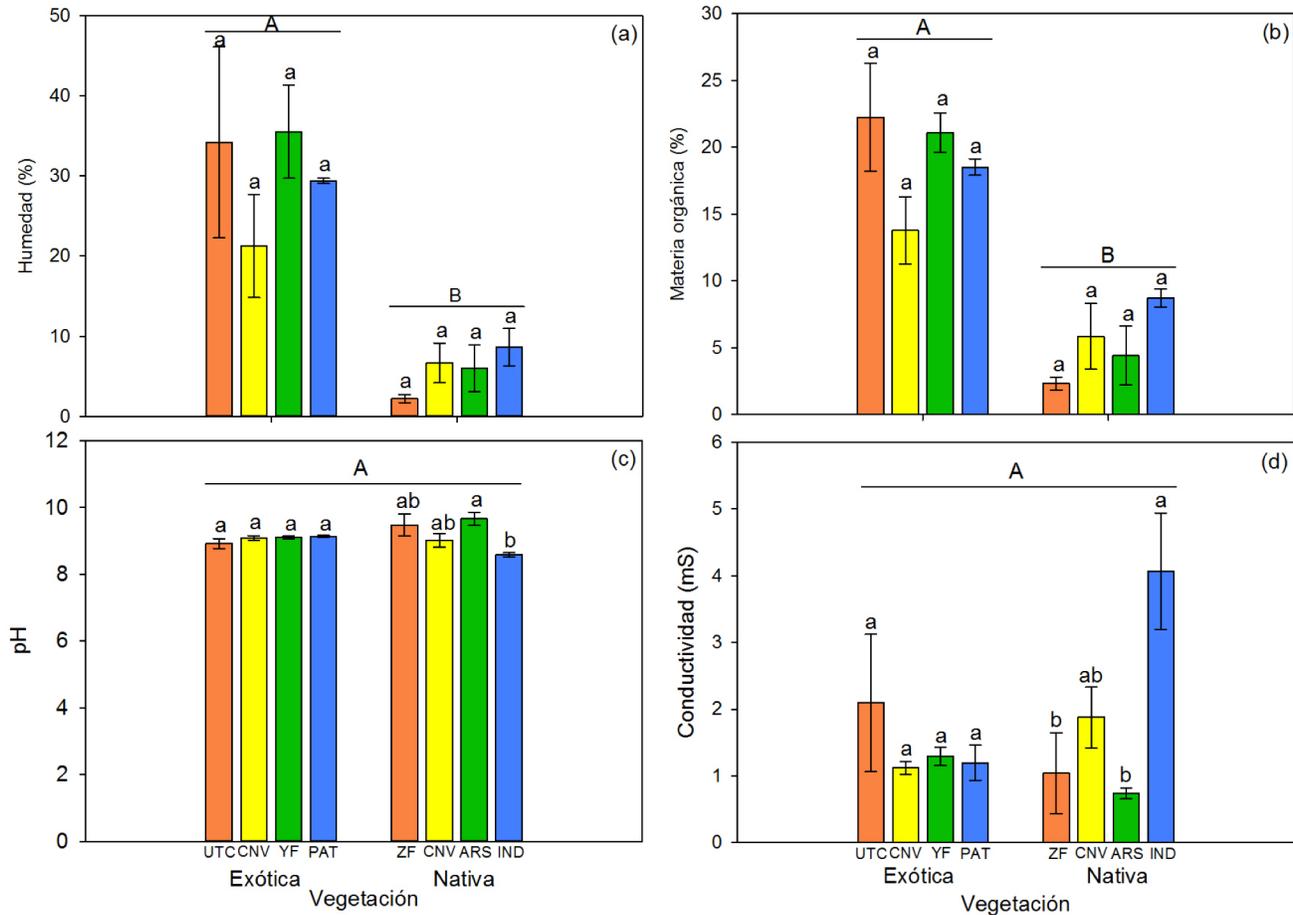


Figura 11. Características fisicoquímicas del suelo (a) humedad, (b) materia orgánica, (c) pH y (d) conductividad en suelos con distinto tipo de vegetación del Parque Industrial Ramos Arizpe. Las barras representan los valores promedio con su respectivo error estándar. Las letras mayúsculas representan diferencias significativas entre los tipos de vegetación, las letras minúsculas representan diferencias significativas entre las empresas dentro del mismo tipo de vegetación, de acuerdo con la comparación post-hoc de la prueba de Tukey del ANOVA de una vía ($p < 0.05$) (ver tabla 5).

Tabla 5. Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre el tipo de vegetación (exótica vs nativa) y el efecto de la empresa para cada tipo de vegetación del Parque Industrial Ramos Arizpe en las diferentes características del suelo. Los efectos significativos se observan en negritas.

	Vegetación		Vegetación Nativa		Vegetación Exótica	
			Empresa		Empresa	
	F	P	F	P	F	P
% Humedad	41.47	<0.001	1.43	0.30	0.77	0.54
Conductividad	0.91	0.35	6.78	0.014	0.71	0.57
pH	0.55	0.47	4.81	0.03	1.21	0.37
% MO	59.13	<0.001	2.49	0.13	2.25	0.16

7.2 Determinación de la evapotranspiración y el uso de agua de áreas verdes urbanas en condiciones controladas

La caracterización del suelo de los mesocosmos se puede observar en la figura 11. El porcentaje de materia orgánica del suelo fue significativamente mayor en la pre-sequía, en comparación con la sequía (Fig. 11a). Por el contrario, la aplicación del riego controlado para promover la sequía no indujo cambios significativos en el carbono orgánico, pH, ni conductividad (Fig. 11, Tabla 6). El contenido de carbono orgánico fue significativamente el mismo, independientemente del tratamiento aplicado (Fig. 11b). Los mesocosmos con vegetación exótica (pasto) mostraron un pH más alcalino en comparación con los mesocosmos con vegetación nativa (cactáceas, y cactáceas y arbusto), durante el período de pre-sequía, por el contrario, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos dentro del período de sequía (Fig. 11c). En cuanto a la conductividad eléctrica del suelo, los mesocosmos sin vegetación (suelo; control) y con vegetación exótica (pasto) mostraron valores menores en comparación con los mesocosmos con vegetación nativa (cactáceas, y cactáceas y arbusto), en ambos períodos (Fig. 11d).



Figura 12. Mesocosmos establecidos en el invernadero durante el período de mantenimiento.

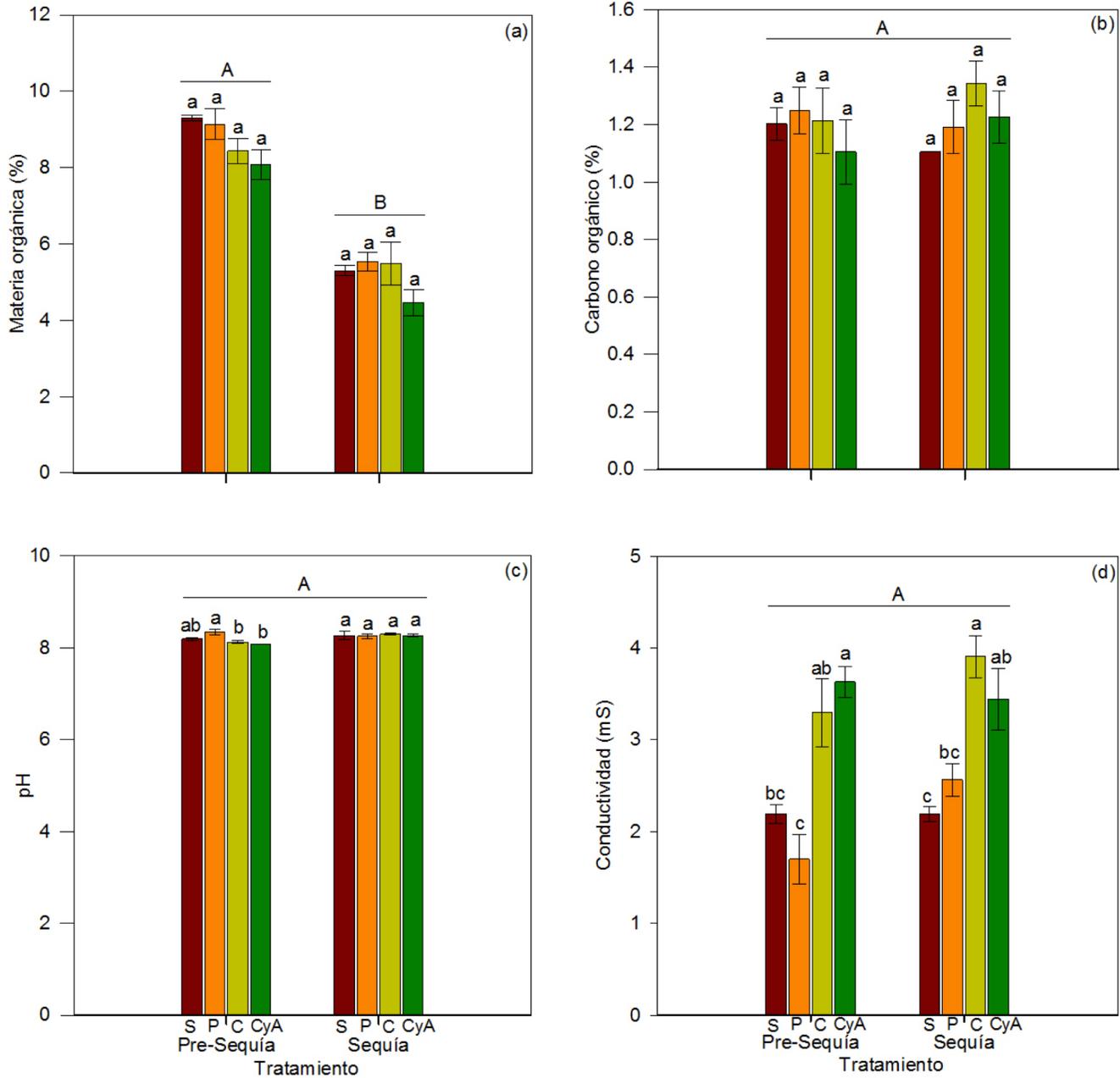


Figura 13. Características fisicoquímicas del suelo (a) materia orgánica, (b) carbono orgánico, (c) pH y (d) conductividad en suelos en pre-sequía y sequía de los diferentes tratamientos, S-Suelo desnudo, P-Pasto, C-Cactáceas, C y A- Cactáceas y Arbusto. Las barras representan los valores promedio con su respectivo error estándar. Las letras mayúsculas representan diferencias significativas entre períodos (pre-sequía y sequía), las letras minúsculas representan diferencias significativas entre los tratamientos dentro del mismo tiempo, de acuerdo con la comparación post-hoc del test de Tukey del ANOVA de una vía ($p < 0.05$) (ver tabla 6).

Tabla 6. Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre pre-sequía y sequía, y el efecto de los tratamientos para cada tiempo en las diferentes características del suelo. Los efectos significativos se observan en negritas.

	Tiempo		Pre-Sequía Tratamiento		Sequía Tratamiento	
	F	P	F	P	F	P
Materia orgánica	151.90	<0.001	3.08	0.09	1.98	0.20
Carbono orgánico	0.17	0.69	0.42	0.74	1.70	0.24
pH	4.16	0.05	10.73	0.004	0.13	0.94
Conductividad	0.87	0.36	13.46	0.002	12.31	0.002

La determinación del uso eficiente del agua (WUE), biomasa seca total, porcentaje de humedad del suelo y evapotranspiración de los diferentes mesocosmos se pueden observar en la figura 12. El WUE fue significativamente mayor en los tratamientos con vegetación nativa (cactáceas y cactáceas-arbustos) en comparación con el tratamiento con vegetación exótica (pasto) (Fig. 12a). En cuanto a la aplicación del riego controlado para promover la sequía no indujo cambios significativos en la biomasa seca total (Fig. 12b), sin embargo, los mesocosmos con vegetación exótica (pasto) mostraron una mayor cantidad de biomasa seca total en comparación con los mesocosmos con vegetación nativa (cactáceas, y cactáceas y arbusto), durante ambos períodos (pre-sequía y sequía) (Fig. 12b). En relación a la humedad, los valores fueron mayores en el período de pre-sequía y cabe resaltar que se mantuvo el mismo ordenamiento en cuanto a cantidad de riego en ambos períodos; iniciando por los mesocosmos con sin vegetación (suelo), seguido de los mesocosmos con vegetación exótica (pasto), posteriormente los mesocosmos con vegetación nativa (cactáceas y arbusto) y finalmente los mesocosmos con vegetación nativa (cactáceas) (Fig. 12c). Con respecto a la evapotranspiración la aplicación del riego controlado para promover la sequía indujo cambios significativos en la evapotranspiración (Fig. 12d), así como también se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos dentro de cada período, siendo en ambos períodos los mesocosmos con vegetación exótica (pasto) los que presentaron mayor evapotranspiración (Fig. 12d).

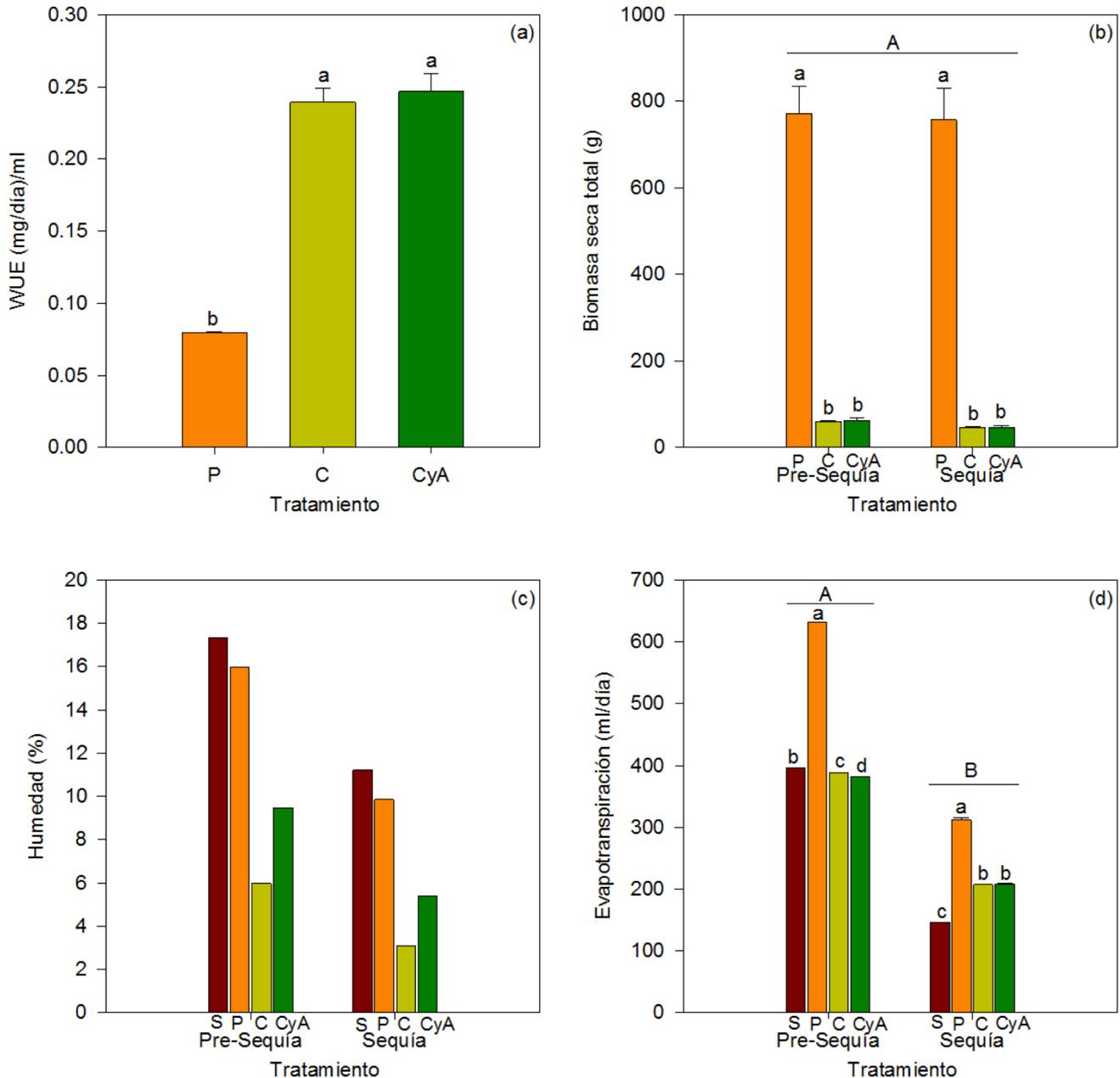


Figura 14. Características hídricas de los mesocosmos (a) WUE, (b) biomasa seca total, (c) humedad, (d) evapotranspiración en pre-sequía y sequía de los diferentes tratamientos, S-Suelo desnudo, P-Pasto, C-Cactáceas, C y A-Cactáceas y Arbusto. Las barras representan los valores promedio con su respectivo error estándar. En el caso de (c) se obtuvieron los valores a partir de un sensor por tratamiento, por lo que no hay variación en las mediciones. En (a) las letras minúsculas representan diferencias significativas entre los tratamientos; en (b) y (d) las letras mayúsculas representan diferencias significativas entre pre-sequía y sequía, las letras minúsculas representan diferencias significativas entre los tratamientos dentro del mismo tiempo, de acuerdo con la comparación post-hoc del test de Tukey del ANOVA de una vía ($p < 0.05$) (ver tabla 7).

Tabla 7. Resultados de la ANOVA de una vía para comprobar las diferencias significativas entre los tratamientos para el caso del WUE, en pre-sequía y sequía, y el efecto de los tratamientos para cada tiempo en la evapotranspiración y la biomasa seca total. Los efectos significativos se observan en negritas.

	Tratamiento		Tiempo		Pre-Sequía		Sequía	
					Tratamiento		Tratamiento	
	F	P	F	P	F	P	F	P
WUE	110.98	<0.001	-	-	-	-	-	-
Biomasa seca total	-	-	0.01	0.94	121.50	<0.001	92.30	<0.001
Evapotranspiración	-	-	39.90	<0.001	139375.14	<0.001	1383.22	<0.001

Al finalizar el período de sequía la vegetación exótica (pasto) de los tres mesocosmos no sobrevivió. Después de siete días de la aplicación del riego disminuido, el pasto comenzó a mostrar una disminución en el vigor y verdor de los mismos. En contraste, la vegetación nativa (i.e. cactáceas y arbusto), la totalidad de los individuos sobrevivieron a la reducción de riego.



Figura 15. Mesocosmos durante el período de sequía. Izquierda- mesocosmos con vegetación nativa (cactáceas y arbusto), derecha-vegetación exótica (pasto bermuda).

8. Discusión

8.1 Determinación del uso de agua y estatus hídrico de áreas verdes urbanas del Parque Industrial Ramos Arizpe

De la descripción del porcentaje destinado a vegetación dentro de las áreas verdes de las empresas del Parque Industrial Ramos Arizpe, se observó que las empresas destinan porcentajes similares independientemente del tipo de vegetación que poseen (p. ej. nativas vs exóticas). Así mismo es relevante la limitada superficie que es destinada a cactáceas (10% en promedio), lo cual se explica por el tamaño y tasa de crecimiento de las mismas, los cuales son mucho menores en comparación a plantas con otras formas de vida (arbustos, herbáceas, etc.) [66].

En relación con las encuestas aplicadas, la diferencia en la cantidad de recursos destinados al mantenimiento de las áreas verdes de acuerdo al tipo de vegetación que poseen es evidente. Es claro que el componente básico de las áreas verdes es la vegetación que poseen, de ahí que su elección es un punto clave del diseño, ya que de ella dependerá, en gran medida, su éxito y el equilibrio en el balance costo-beneficio [56].

Las recomendaciones de riego para pastos en la época de máxima demanda, la cual corresponde a los meses más calurosos, es de seis a ocho litros diarios de agua por metro cuadrado; el CNV-E, YF y PAT se apegan a esta recomendación mientras que UTC excede aproximadamente el doble de las necesidades hídricas del pasto [55]. Por otro lado los resultados obtenidos no muestran ninguna anomalía en cuanto a la cantidad de clorofila presente en los pastos de las diferentes empresas, es decir que presentan valores parecidos a los reportados en la literatura [78]. La cantidad de clorofila se relaciona con el color del pasto y por consiguiente con su estética, dado que no se encontraron diferencias significativas entre las empresas, se entiende que una vez cubiertas las necesidades hídricas del pasto su apariencia no varía al aplicar riego excedente. Cabe resaltar que las áreas verdes con vegetación exótica del CNV-E presentaron la menor cantidad de riego y pastos con el mayor contenido relativo de agua, destacando las prácticas de riego inadecuadas en el resto de las empresas (riego excesivo). Las diferencias respecto al área foliar específica de los pastos se debe principalmente a las especies de pastos sembradas y a la frecuencia de poda.

Teniendo en cuenta que el porcentaje de humedad del suelo no varió entre las empresas con vegetación exótica, y que la cantidad de riego aplicada en la UTC fue significativamente mayor, dicho riego resulta excesivo, pues está sobrepasando la capacidad de campo del suelo [79].

El porcentaje de materia orgánica que presentaron los suelos de las áreas verdes con vegetación exótica están evaluados con un contenido de materia orgánica alta y muy alta [80]; mientras que los suelos de empresas con vegetación nativa han sido evaluados con un contenido de materia orgánica media y media alta [80]. La materia orgánica del suelo está relacionada con el tipo de vegetación presente; en general la vegetación exótica tiene mayor biomasa al tener un metabolismo C3 que se caracteriza por tasas de crecimiento altas [55], por lo que hay mayor cantidad de residuos de plantas que se transforman en materia orgánica mediante conversiones biológicas, además de que las empresas que cuentan con vegetación exótica en sus áreas verdes realizan mejoramiento del suelo previo a la siembra de las mismas, lo cual también ocasiona un incremento en la materia orgánica del suelo. En cambio las especies nativas, específicamente las cactáceas y suculentas poseen un metabolismo CAM, con el cual reducen al mínimo la fotorrespiración y ahorran agua mediante la separación de estos pasos en el tiempo, entre el día y la noche; tienen tasas de crecimiento bajas [81].

Por otra parte los suelos sódicos son aquellos que tienen alta concentración de sodio intercambiable, mientras que los suelos salino-sódicos tienen exceso de sales, principalmente sódicas [80]. En los desiertos hay suelos salinos a causa de la alta evaporación del agua aportada históricamente, adicional a esto la empresa IND realizó un mejoramiento del suelo con arenas, el cual impactó en un pH alcalino del suelo.

En particular las áreas verdes de la UTC fueron las únicas brindaron servicios recreativos y de relajación de manera directa a los usuarios, adicionales al resto de servicios brindadas por el resto de áreas verdes (remoción de contaminantes, regulación del clima, regulación de la erosión, entre otros). En las instituciones educativas las áreas verdes tienen un papel de gran importancia ya que permiten la recreación y el goce del valor y belleza de la naturaleza, ofreciendo tranquilidad y calma, ambas fundamentales para la salud mental y física, así como para la estimulación del aprendizaje. Además de ofrecer zonas sombreadas para el descanso y el juego, cruciales en los espacios escolares. Así como brindar hábitat o refugio temporal para la fauna de la región, con lo que se aportan sitios de observación y aprendizaje sobre los ciclos de la naturaleza y las relaciones entre los organismos[82]. No obstante, la UTC podría reducir el riego de sus áreas verdes a niveles de otras empresas que presentaron un menor riego y condiciones comparables de humedad del suelo y verdor del pasto, como CNV-E con 5.4 L/m² al día de agua.

8.2 Determinación de la evapotranspiración y el uso de agua de áreas verdes urbanas en condiciones controladas

El uso eficiente de agua (WUE, por las siglas en inglés de water use efficiency) nos permite conocer cuánta agua es necesaria para la incorporación de biomasa por parte de las plantas [83], por lo tanto, nos permite estimar la cantidad necesaria para el mantenimiento de áreas verdes urbanas a largo plazo. Específicamente, nos permite predecir tanto la producción máxima en condiciones óptimas de humedad del suelo como los riesgos de producción en condiciones de agua limitada es importante para el diseño de estrategias de irrigación [83]. En este sentido, como era de esperarse, los mesocosmos con vegetación nativa (i.e. cactáceas y cactáceas y arbustos), presentaron una mayor eficiencia del uso del agua, a pesar de que el tratamiento con pasto fue el que generó mayor biomasa seca total también fue el tratamiento con mayor consumo de agua y mayor evapotranspiración tanto en el período de pre-sequía como en el de sequía. Esto se debe al tipo de fotosíntesis al que recurren las especies vegetales utilizadas [9, 66]. El pasto utilizado (*C. dactylon*) presentan un metabolismo C4, en el cual, las reacciones dependientes de la luz y el ciclo de Calvin están separadas físicamente, las reacciones dependientes de la luz se producen en las células del mesófilo y el ciclo de Calvin ocurre en las células del haz vascular. Este proceso tiene su precio energético, se debe gastar ATP, sin embargo, esta estrategia reduce la fotorrespiración, en condiciones cálidas. Los beneficios de una menor fotorrespiración probablemente superan el costo en ATP de pasar CO₂ de la célula del mesófilo a las células del haz vascular [55, 84].

En contraste, la vegetación nativa específicamente las cactáceas, las cuales presentan un metabolismo CAM, el cual en vez de separar las reacciones dependientes de la luz y el uso de CO₂ en el ciclo de Calvin en el espacio, separan estos procesos en el tiempo. Por la noche, abren sus estomas para que el CO₂ se difunda en la planta, este CO₂ se fija en el oxaloacetato mediante la PEP carboxilasa, que luego se convierte en malato o un ácido orgánico. El ácido orgánico se almacena dentro de vacuolas hasta el día siguiente. Durante el día las plantas CAM no abren sus estomas, pero pueden llevar a cabo la fotosíntesis. La vía CAM al igual que la C4 necesita ATP, sin embargo, las especies que utilizan la fotosíntesis CAM no solo evitan la fotorrespiración, sino que también usan el agua de forma muy eficiente. Sus estomas solo se abren por la noche, cuando la humedad tiende a subir y la temperatura a bajar y ambos factores reducen la pérdida de agua [66, 85].

Para evitar realizar riegos excesivos y poco eficientes es muy importante que los profesionales dedicados al diseño y mantenimiento de las áreas verdes públicas y privadas conozcan las prácticas

racionales del riego, necesidades hídricas de la vegetación, instalaciones de riego, calidad del agua y manejo de los riegos, de manera que en un futuro no lejano se pueda afirmar que las áreas verdes no son derrochadoras de agua, sino que realizan un uso plenamente eficiente de esta. Es evidente que la mayor eficiencia en el uso del agua se logra desde el diseño de las áreas verdes y considerando las características propias de las zonas áridas, lo más recomendable es emplear vegetación adaptada a la región, la cual únicamente requiere riegos de auxilio. Sin embargo, en caso de que sea necesario emplear vegetación exótica en las áreas verdes urbanas de zonas áridas, debido a fines recreativos u otros, las recomendaciones de irrigación de alrededor de 5.4 L/m² al día, el cuál es el riego mínimo comprobado en campo (CNV-E) para mantener las condiciones estéticas esperadas de este tipo de vegetación.

Aunado a lo anterior, la respuesta a la sequía por parte de la vegetación nativa y exótica resulta la importancia de tener en cuenta las características climatológicas de cada región. En este sentido, a pesar de que los mesocosmos con vegetación nativa iniciaron el riego controlado con niveles de humedad del suelo menores en comparación a los mesocosmos con vegetación exótica (cactáceas 3.08%, cactáceas y arbustos 5.38% y pasto 9.86%), y de que la disminución del riego indujo un decremento de la humedad comparable en ambos tratamientos, el pasto presentó una mortalidad total, caso contrario a la vegetación nativa en la que todos los individuos sobrevivieron. En un escenario de cambio climático en el que se espera un incremento en la duración e intensidad de las sequías [86], la cantidad de agua destinada al riego de las áreas verdes con vegetación exótica tendrá que incrementarse para mantener el aspecto estético, mientras que las áreas verdes con vegetación nativa podrán soportar humedades de hasta 3%.

Los tratamientos control y pastos presentaron una conductividad eléctrica del suelo significativamente mayor a la presentada por los tratamientos con vegetación nativa. El incremento de la conductividad eléctrica puede explicarse como resultado del mayor riego que fue necesario aplicar en dichos tratamientos [56, 79]. Por otra parte, la materia orgánica fue significativamente menor en el período de sequía en comparación con la pre-sequía, esto podría explicarse por una leve erosión por el riego o el viento. En el primer caso, el impacto del agua desplazó la materia. Y en el caso de la erosión por viento, se puede dar por deflación, cuando el viento traslada pequeñas partículas, o por abrasión, cuando las partículas que transporta el aire desgastan las superficies [79]. En el resto de las características del suelo estudiadas, no se observaron efectos relevantes por parte de la aplicación de los tratamientos y/o la sequía.



8.3 Discusión general

El uso de agua en las áreas verdes es un tema poco explorado, a pesar de la enorme cantidad que es utilizada en las ciudades (70% del agua). De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, la vegetación nativa realiza un uso más eficiente del agua en comparación con la vegetación exótica (pastos). Dentro de la vegetación nativa, el uso de arbustos y otras plantas con mayores tasas de crecimiento, pero adaptadas a las condiciones locales, tiene mayores beneficios en cuanto a la reducción de la evapotranspiración y el aumento en la eficiencia del uso del agua, de ahí la selección de esta combinación por parte de las áreas verdes en el parque industrial resulte en una menor inversión en el mantenimiento de estas.

Estas menores tasas de evapotranspiración registradas en las áreas verdes con vegetación nativa aún serían suficientes para garantizar la reducción de la temperatura urbana [87, 88], manteniendo este servicio ecosistémico, sin comprometer el uso del recurso hídrico, limitado en las zonas áridas y semiáridas. En general, los resultados de varios estudios destacan el importante papel de las áreas verdes en la mitigación de los efectos de la isla de calor urbano, un importante servicio del ecosistema urbano [87-91].

Adicionalmente, ante un escenario de cambio climático se espera un incremento del costo ambiental de las áreas verdes con pastos, derivado de las sequías más frecuentes y más intensas [86]. Por el contrario, las cactáceas hicieron frente a esta sequía esperada de acuerdo a las predicciones globales, por lo que, aún en un contexto de cambio climático las áreas verdes con vegetación nativa seguirán brindando los servicios ecosistémicos de mitigación de los efectos de la isla de calor urbano, control del polvo y del viento, contribuir con diferentes usos etnobotánicos, remoción de contaminantes y partículas suspendidas, retención del suelo, reducción de ruido, además de brindar confort por su atractivo estético con costos económicos y ambientales bajos.

El uso de pastos en áreas verdes urbanas representa un gasto económico elevado derivado de las modificaciones previas a su establecimiento, así como de su mantenimiento, además de un elevado costo ambiental en zonas áridas, al representar un alto gasto de agua, mientras que los servicios ecosistémicos que brindan son similares a los brindados por las áreas verdes con vegetación nativa, que no presentan gastos de mantenimiento ni riego posterior.

Si bien es cierto que el tipo de vegetación parece no tener un efecto en las propiedades fisicoquímicas de los suelos, como se evidenció en la aproximación en invernadero, las modificaciones realizadas en campo previo al establecimiento de las áreas verdes con vegetación exótica, fueron necesarias para



garantizar la supervivencia de los pastos, lo cual incrementa aún más los costos ambientales de dichas zonas.

Existen al menos 420 000 tipos diferentes de plantas en nuestro planeta, de las cuales 350 especies de cactáceas y alrededor de 750 especies de suculentas se desarrollan en el Desierto Chihuahuense [92-95]. Cada planta existente es el producto de un proceso evolutivo que la ha dejado adaptada a un conjunto particular de condiciones climáticas y edáficas [9]. Para que una planta se desarrolle adecuadamente, debemos proporcionarle condiciones similares a las de entorno natural. Para ello, se pueden utilizar grandes cantidades de energía y agua para modificar las áreas verdes, de modo que sea adecuado para plantas de entornos muy diferentes. Eso es lo que estamos haciendo en nuestros intentos para reproducir los jardines propios de otras latitudes con climas más templados. Las restricciones en el uso del agua están haciendo de este estilo de jardinería una catástrofe ecológica y altos costos económicos [56]. Por el contrario, podemos cultivar aquellas plantas que son originarias del área de interés (las plantas nativas) o de climas similares, lo que resulta en un amplio catálogo del cual seleccionar aquellas que resulten más estéticas y adecuadas para la región [20, 29].

9. Conclusiones

Con los resultados obtenidos de la determinación del uso de agua y estatus hídrico de áreas verdes del Parque industrial Ramos Arizpe y la determinación de la evapotranspiración y el uso eficiente de agua de áreas verdes urbanas en condiciones controladas se concluye lo siguiente:

- En las áreas verdes de las empresas estudiadas del Parque Industrial Ramos Arizpe, el tamaño de las mismas es independiente del tipo de vegetación que presenten. En general, se destinan tamaños similares tanto a áreas verdes con vegetación exótica como con vegetación nativa.
- El mantenimiento en general de las áreas verdes con vegetación exótica en zonas áridas es más demandante y costoso que el mantenimiento de las áreas verdes con vegetación nativa.
- El consumo de agua para el mantenimiento de las áreas verdes es muy diferente; en el caso de las áreas verdes con vegetación nativa el riego es nulo o esporádico, mientras que el riego para las áreas verdes con vegetación exótica es de 5-13 L/m² por día.
- Las prácticas de riego en las empresas exceden, en la mayoría de los casos, las necesidades hídricas de la vegetación, disminuyendo el uso eficiente del agua en las regiones áridas.
- En caso de que sea necesario emplear vegetación exótica en las áreas verdes urbanas de zonas áridas, debido a fines recreativos u otros, las recomendaciones de irrigación, son de alrededor de 5.4 L/m² al día.
- Una vez cubiertas las necesidades hídricas del pasto no existe un gradiente de respuesta en su apariencia (verdor).
- La vegetación nativa, tiene una mayor eficiencia del uso del agua, a pesar de que la vegetación exótica (pasto) genera mayor biomasa seca total, ya que también consume una mayor cantidad de agua y presenta mayor evapotranspiración.
- Dentro de la vegetación nativa, el uso de arbustos y otras plantas con mayores tasas de crecimiento, pero adaptadas a las condiciones locales tiene los mayores beneficios en cuanto a la reducción de la evapotranspiración y el aumento en la eficiencia del uso del agua.
- La vegetación nativa tiene una mayor resistencia a la sequía, por lo que, en un escenario de cambio climático, se esperan menores costos de mantenimiento y menor gasto de recurso hídrico.

10. Bibliografía

- [1] U.N.B. Commission, World Commission on Environment and Development (WCED): Our Common Future. 1987, Oxford: Oxford University Press.
- [2] J.F. Hake, H. Schlor, K. Schurmann, S. Venghaus, Ethics, sustainability and the water, energy, food nexus approach - a new integrated assessment of urban systems, in Cue 2015 - Applied Energy Symposium and Summit 2015: Low Carbon Cities and Urban Energy Systems, J. Yan, B. Chen, and J. Yang, Editors. 2016, Elsevier Science Bv: Amsterdam. p. 236-242.
- [3] L. Paolini, E. Araoz, A. Gioia, P.A. Powell. Vegetation productivity trends in response to urban dynamics. *Urban For. Urban Green.* 17 (2016) 211-216.
- [4] D. Shi, W. Wang, G. Jiang, X. Peng, Y. Yu, Y. Li, W. Ding. Effects of disturbed landforms on the soil water retention function during urbanization process in the Three Gorges Reservoir Region, China. *CATENA.* 144 (2016) 84-93.
- [5] G.Q. Xu, N.G. Mcdowell, Y. Li. A possible link between life and death of a xeric tree in desert. *J. Plant Physiol.* 194 (2016) 35-44.
- [6] E. Litvak, D.E. Pataki. Evapotranspiration of urban lawns in a semi-arid environment: An in situ evaluation of microclimatic conditions and watering recommendations. *J. Arid Environ.* 134 (2016) 87-96.
- [7] A. Kimpton. A spatial analytic approach for classifying greenspace and comparing greenspace social equity. *Applied Geography.* 82 (2017) 129-142.
- [8] Y.-C. Chen, H.-W. Chiu, Y.-F. Su, Y.-C. Wu, K.-S. Cheng. Does urbanization increase diurnal land surface temperature variation? Evidence and implications. *Landsc. Urban Plan.* 157 (2017) 247-258.
- [9] K. Handreck, Good gardens with less water. 2008: Csiro Publishing.
- [10] T.J. Volo, E.R. Vivoni, B.L. Ruddell. An ecohydrological approach to conserving urban water through optimized landscape irrigation schedules. *Landsc. Urban Plan.* 133 (2015) 127-132.
- [11] S.T.A. Pickett, M.L. Cadenasso, J.M. Grove, C.G. Boone, P.M. Groffman, E. Irwin, S.S. Kaushal, V. Marshall, B.P. Mcgrath, C.H. Nilon, R.V. Pouyat, K. Szlavecz, A. Troy, P. Warren. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. *J. Environ. Manage.* 92 (2011) 331-362.
- [12] C. Unido, B.L.I. Termica. El comportamiento térmico y la inercia térmica de las fábricas con bloques Termoarcilla. (1997).

- [13] H.A. Makse, S. Havlin, H.E. Stanley. Modelling urban growth patterns. *Nature*. 377 (1995) 608.
- [14] M. Batty. The size, scale, and shape of cities. *Science*. 319 (2008) 769-771.
- [15] Y. Wang, R. De Groot, F. Bakker, H. Wörtche, R. Leemans. Thermal comfort in urban green spaces: a survey on a Dutch university campus. *Int. J. Biometeorol.* 61 (2017) 87-101.
- [16] K.R. Gunawardena, M.J. Wells, T. Kershaw. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Sci. Total Environ.* 584 (2017) 1040-1055.
- [17] H. Sukopp, S. Weiler. Biotope mapping and nature conservation strategies in urban areas of the Federal Republic of Germany. *Landsc. Urban Plan.* 15 (1988) 39-58.
- [18] M.A. White, R.R. Nemani, P.E. Thornton, S.W. Running. Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems*. 5 (2002) 260-273.
- [19] K. Snir, D. Pearlmutter, E. Erell. The moderating effect of water-efficient ground cover vegetation on pedestrian thermal stress. *Landsc. Urban Plan.* 152 (2016) 1-12.
- [20] R.V. Pouyat, J. Russell-Anelli, I.D. Yesilonis, P.M. Groffman, Soil carbon in urban forest ecosystems. 2003: CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- [21] H. Akbari, A. Rosenfeld, H. Taha, L. Gartland. Mitigation of summer urban heat islands to save electricity and smog. in 76th Annual Meteorological Society Meeting, Atlanta, GA. 1996.
- [22] H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*. 70 (2001) 295-310.
- [23] H. Taha. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin. (1996).
- [24] J.W. Gregg, C.G. Jones, T.E. Dawson. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*. 424 (2003) 183.
- [25] R.V. Pouyat, I.D. Yesilonis, J. Russell-Anelli, N.K. Neerchal. Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71 (2007) 1010-1019.
- [26] P. Bullock, P. Gregory. Soils: a neglected resource in urban areas. *Soils in the urban environment*. (1991) 1-4.
- [27] C.R. De Kimpe, J.-L. Morel. Urban soil management: a growing concern. *Soil Science*. 165 (2000) 31-40.

- [28] R.V. Pouyat, D.E. Pataki, K.T. Belt, P.M. Groffman, J. Hom, L.E. Band, Effects of urban land-use change on biogeochemical cycles, in *Terrestrial ecosystems in a changing world*. 2007, Springer. p. 45-58.
- [29] U. Schleuß, Q. Wu, H.-P. Blume. Variability of soils in urban and periurban areas in Northern Germany. *Catena*. 33 (1998) 255-270.
- [30] P.J. Craul, *Urban soil in landscape design*. 1992: John Wiley & Sons.
- [31] C. Jim. Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth. *Urban Ecosyst*. 2 (1998) 171-181.
- [32] T. Oke, The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects, in *Wind climate in cities*. 1995, Springer. p. 81-107.
- [33] H. Mount, L. Hernandez, T. Goddard, S. Indrick. Temperature signatures for anthropogenic soils in New York City. *Classification, Correlation, and Management of Anthropogenic Soils, Proceedings Nevada and California, September 21eOctober. 2 (1999) 137e140*.
- [34] C.S. White, M.J. McDonnell. Nitrogen cycling processes and soil characteristics in an urban versus rural forest. *Biogeochemistry*. 5 (1988) 243-262.
- [35] D.A. Steinberg, R.V. Pouyat, R.W. Parmelee, P.M. Groffman. Earthworm abundance and nitrogen mineralization rates along an urban-rural land use gradient. *Soil Biology and Biochemistry*. 29 (1997) 427-430.
- [36] J.G. Ehrenfeld, P. Kourtev, W. Huang. Changes in soil functions following invasions of exotic understory plants in deciduous forests. *Ecological applications*. 11 (2001) 1287-1300.
- [37] G. Lovett, M. Traynor, R. Pouyat, M. Carreiro, W. Zhu, J. Baxter. Nitrogen deposition along an urban-rural gradient in the New York City metropolitan area. *Environ. Sci. Technol*. 34 (2000) 4294-4300.
- [38] C.M.D.Q. Orsini, M.H. Tabacniks, N. Artaxo, M.D.F. Andrade, A. Kerr, Characteristics of fine and coarse particles of natural and urban aerosols of Brazil. 1986, Sao Paulo Univ.(Brazil). Inst. de Fisica.
- [39] C. Bonil, E. Caruso, E. Cereda, G. Lombardo, G. Braga Marcazzan, P. Redaelli. Particulate matter elemental characterization in urban areas: Pollution and source identification. *J. Aerosol Sci*. 19 (1988) 1271-1274.
- [40] D.S. Lee, J.W. Longhurst. A comparison between wet and bulk deposition at an urban site in the UK. *Water, Air, Soil Pollut*. 64 (1992) 635-648.

- [41] F. Wong, T. Harner, Q.-T. Liu, M.L. Diamond. Using experimental and forest soils to investigate the uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) along an urban-rural gradient. *Environmental Pollution*. 129 (2004) 387-398.
- [42] I. Thornton. Metal contamination of soils in urban areas. *Soils in the urban environment*. (1991) 47-75.
- [43] C.S. Wong, X. Li, I. Thornton. Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental pollution*. 142 (2006) 1-16.
- [44] H. Van Bohemen, W.J. Van De Laak. The influence of road infrastructure and traffic on soil, water, and air quality. *Environmental Management*. 31 (2003) 0050-0068.
- [45] C. Zhang. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental pollution*. 142 (2006) 501-511.
- [46] D.C. Walsh, S.N. Chillrud, H.J. Simpson, R.F. Bopp. Refuse incinerator particulate emissions and combustion residues for New York City during the 20th century. *Environ. Sci. Technol*. 35 (2001) 2441-2447.
- [47] P. Govil, G. Reddy, A. Krishna. Contamination of soil due to heavy metals in the Patancheru industrial development area, Andhra Pradesh, India. *Environ. Geol*. 41 (2001) 461-469.
- [48] M. Schuhmacher, M. Meneses, S. Granero, J. Llobet, J. Domingo. Trace element pollution of soils collected near a municipal solid waste incinerator: human health risk. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 59 (1997) 861-867.
- [49] R. Pouyat, W. Effland. The investigation and classification of humanly modified soils in the Baltimore Ecosystem Study. *Classification, Correlation, and Management of Anthropogenic Soils*. USDA-NRCS, National Soil Survey Center, Nevada and California. (1999) 141-154.
- [50] M. Ahyerre, G. Chebbo, B. Tassin, E. Gaume. Storm water quality modelling, an ambitious objective? *Water Sci. Technol*. 37 (1998) 205-213.
- [51] M. Hough, *Cities and natural process*. 2002: Routledge.
- [52] R. William, A. Goodwell, M. Richardson, P.V.V. Le, P. Kumar, A.S. Stillwell. An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. *Ecol. Eng*. 95 (2016) 1-9.
- [53] Y. Feng, S. Burian, C. Pomeroy. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. *J. Hydrol*. 542 (2016) 744-755.
- [54] H. Heavenrich, S.J. Hall. Elevated soil nitrogen pools after conversion of turfgrass to water-efficient residential landscapes. *Environ. Res. Lett*. 11 (2016) 18.

- [55] M. Pessaraki, Handbook of turfgrass management and physiology. 2007: CRC press.
- [56] A.M. Rodríguez, Manual de riego de jardines. 2004: Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca.
- [57] P. Gkatsopoulos. A Methodology for Calculating Cooling from Vegetation Evapotranspiration for Use in Urban Space Microclimate Simulations. *Procedia Environmental Sciences*. 38 (2017) 477-484.
- [58] V. Novák, Evapotranspiration in the Soil-plant-atmosphere System. 2012: Springer Science & Business Media.
- [59] D. Hillel. Soil and Water-Physical principle and processes—Academic Press Inc. Orlando, 288p. (1971).
- [60] M.A. Yassin, A.A. Alazba, M.A. Mattar. Modelling daily evapotranspiration using artificial neural networks under hyper arid conditions. *Pak. J. Agric. Sci.* 53 (2016) 695-712.
- [61] C.L. Meng. The integrated urban land model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 7 (2015) 759-773.
- [62] I. Kowarik. Some response of flora and vegetation to urbanization in central Europe. *Urban ecology*. (1990) 45-74.
- [63] P. Rivera, J.L. Villasenor, T. Terrazas. Meso- or xeromorphic? Foliar characters of Asteraceae in a xeric scrub of Mexico. *Bot. Stud.* 58 (2017) 16.
- [64] H.M. Hernández, La vida en los desiertos mexicanos. 2006: Secretaría de Educación Pública.
- [65] N.E. Christians, A.J. Patton, Q.D. Law, Fundamentals of turfgrass management. 2016: John Wiley & Sons.
- [66] A.H. Fitter, R.K. Hay, Environmental physiology of plants. 2012: Academic press.
- [67] I. Reyes Avilés, J.J. Gutiérrez Chaparro. Los servicios ambientales de la arborización urbana: retos y aportes para la sustentabilidad de la ciudad de Toluca. *Quivera*. 12 (2010).
- [68] K. Anna, K. Jaan-Henrik, K. Jakub, H. Dagmar. Ecosystem services in urban land use planning: Integration challenges in complex urban settings-Case of Stockholm. *Ecosyst. Serv.* 22 (2016) 204-212.
- [69] S. Burgin. What about biodiversity? Redefining urban sustainable management to incorporate endemic fauna with particular reference to Australia. *Urban Ecosyst.* 19 (2016) 669-678.
- [70] P. Bolund, S. Hunhammar. Ecosystem services in urban areas. *Ecol. Econ.* 29 (1999) 293-301.
- [71] L.D. Ruiz Juarez. Impacto del programa desarrollo rural en el sector agrícola del municipio de Ramos Arizpe, desde una perspectiva de sustentabilidad. (2014).

- [72] R. Webster. Soil Sampling and Methods of Analysis - Edited by M.R. Carter & E.G. Gregorich. Eur. J. Soil Sci. 59 (2008) 1010-1011.
- [73] E. Bakr. A new software for measuring leaf area, and area damaged by *Tetranychus urticae* Koch. Journal of Applied Entomology. 129 (2005) 173-175.
- [74] P. Radford. Growth Analysis Formulae-Their Use and Abuse 1. Crop science. 7 (1967) 171-175.
- [75] R. Arocena, Efectos de la eutrofización en el zoobentos de un sistema lagunar costero (L. Rocha, Uruguay) estudiados mediante mesocosmos. 2000, Facultad de Ciencias Naturales y Museo.
- [76] G.W. Burton, G.M. Prine, J.E. Jackson. Studies of Drouth Tolerance and Water Use of Several Southern Grasses 1. Agronomy Journal. 49 (1957) 498-503.
- [77] J. Grime, R. Hunt. Relative growth-rate: its range and adaptive significance in a local flora. The Journal of Ecology. (1975) 393-422.
- [78] D. Ferienčíková, M. Kizeková, L. Ondrášek, M. Zimková. Grassland-part of mountain agriculture and landscape, GMARI, Banska Bystrica, Slovakia, 27-28 September 2006. Grassland-part of mountain agriculture and landscape, GMARI, Banska Bystrica, Slovakia, 27-28 September 2006. (2006).
- [79] B.D. Hudson. Soil organic matter and available water capacity. J. Soil Water Conserv. 49 (1994) 189-194.
- [80] N. Aguilera Herrera, N.A. Herrera, Tratado de edafología de México. 1989.
- [81] A.S. Bhagwat. Photosynthetic carbon assimilation of C3, C4, and CAM pathways. Handbook of Photosynthesis. (2005) 367-384.
- [82] M. Robles, E. Näslund-Hadley, M.C. Ramos, J.R. Paredes. School Green Areas. (2015).
- [83] M.M. Holloway-Phillips, T.J. Brodribb. Minimum hydraulic safety leads to maximum water-use efficiency in a forage grass. Plant, Cell Environ. 34 (2011) 302-313.
- [84] K. Winter, J. Aranda, J.A. Holtum. Carbon isotope composition and water-use efficiency in plants with crassulacean acid metabolism. Funct. Plant Biol. 32 (2005) 381-388.
- [85] P.S. Nobel. Water relations and photosynthesis of a barrel cactus, *Ferocactus acanthodes*, in the Colorado Desert. Oecologia. 27 (1977) 117-133.
- [86] J. Ephraums, G. Jenkins, Climate change 1992. 1992: Cambridge University Press.

- [87] R.C. Estoque, Y. Murayama, S.W. Myint. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Sci. Total Environ.* 577 (2017) 349-359.
- [88] S. Hamada, T. Ohta. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban For. Urban Green.* 9 (2010) 15-24.
- [89] G.-Y. Qiu, H.-Y. Li, Q.-T. Zhang, C. Wan, X.-J. Liang, X.-Z. Li. Effects of evapotranspiration on mitigation of urban temperature by vegetation and urban agriculture. *Journal of Integrative Agriculture.* 12 (2013) 1307-1315.
- [90] B. Zhang, J.-X. Gao, Y. Yang. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. *Build. Environ.* 76 (2014) 37-43.
- [91] L. Shashua-Bar, M.E. Hoffman. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and buildings.* 31 (2000) 221-235.
- [92] H. Bravo Hollis, R. Sánchez Mejorada, *Las cactáceas de México.* 1978.
- [93] W. Cullmann, E. Götz, G. Gröner, *The encyclopedia of cacti.* 1986, Alphabooks.
- [94] C. Backeberg, *Cactus lexicon.* 1977.
- [95] N.L. Britton, J.N. Rose, *The Cactaceae: descriptions and illustrations of plants of the cactus family.* Vol. 3. 1963: Courier Corporation.