UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

CRECIMIENTO RADICAL DE *Taxodium mucronatum* TEN. EN UN ÁREA URBANA

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO MEXICO
DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Presenta:

PABLO HERNÁNDEZ LÓPEZ

Bajo la dirección de:
DIRECTOR: DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO
CODIRECTOR: DR. LEOPOLDO MOHEDANO CABALLERO

Chapingo, Estado de México, Diciembre de 2017

DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

CRECIMIENTO RADICAL DE *Taxodium mucronatum* Ten. EN UN ÁREA URBANA.

Tesis realizada por **Pablo Hernández López** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales

Director

Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

Codirector

Dr. Leopoldo Mohedano Caballero

Asesor

Dr. Tomás Martínez Trinidad

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS iv
LISTA DE FIGURAS iv
AGRADECIMIENTOS v
DATOS BIOGRÁFICOS vi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL 1
1.1 Objetivos 3
1.2 Literatura citada 4
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA 5
2.1. El arbolado urbano 5
2.2. Problemática de los árboles urbanos 6
2.3. Estudio de las raíces de los árboles urbanos 7
2.4. El rizotrón y su uso en el estudio de las raices 10
2.6. *Taxodium mucronatum* Ten. 12
2.7. Literatura citada 13
CAPÍTULO 3. CRECIMIENTO RADICAL DE *Taxodium mucronatum* Ten. EN UN ÁREA URBANA 20
RESUMEN 20
ABSTRACT 21
3.1. Introducción 22
3.2. Materiales y Método 24
3.2.1. Caracterización del sitio 24
3.2.2. Diseño experimental 24
3.2.3. Establecimiento del rizotrón 25
3.2.4. Diseño de plantación 27
3.2.5. Análisis estadístico 28
3.3. Resultados y discusión 28
3.3.1. Compactación del suelo 29
3.3.2. Longitud radical 30
3.3.3. Número de raíces 33
3.4. Conclusiones 36
3.5. Literatura citada 37

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos del experimento 24
Cuadro 2. Compactación del suelo circundante de la plantación a diez días posteriores al inicio del experimento. 30
Cuadro 3. Análisis estadístico para longitud del sistema radical (cm) de *Taxodium mucronatum* después de 12 meses de crecimiento. 31
Cuadro 4. Análisis estadístico para número de raíces de *Taxodium mucronatum* después de 12 meses de crecimiento. 33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de rizotrón utilizado. 26
Figura 2. Aspecto de los árboles recién plantados con el uso de un rizotrón. ..27
Figura 3. Muestras del crecimiento radical de *Taxodium mucronatum* en los rizotrones, ...32
Figura 4. Interacción entre riego y suelo en respuesta al número de raíces desarrolladas de *Taxodium mucronatum.* 34
Figura 5. Longitud radical y número de raíces de *Taxodium mucronatum* por tratamiento a 12 meses posteriores a la plantación. 35

AGRADECIMIENTOS

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

A la Universidad Autónoma Chapingo y a la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales por permitirme realizar mis estudios en sus instalaciones.

A los miembros del comité asesor, en especial al Dr. Leopoldo Mohedano Caballero por su excelente guía en esta investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Pablo Hernández López
Fecha de nacimiento: 04 de abril de 1990
Lugar de nacimiento: Tulpetlac, Estado de México
No. Cartilla militar: 0086863
CURP: HELP900404HMCRPB05
Profesión: Ingeniero en restauración forestal
Cédula profesional:

Desarrollo académico

Preparatoria: Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.
Licenciatura: División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los árboles en las áreas urbanas ofrecen muchos beneficios, tanto directos como indirectos, entre estos, los más importantes son el control de la contaminación, la regulación del microclima, protección contra el viento, control de la erosión, el aporte cultural y simbólico, proveen sitios de recreación, el aumento del valor de las propiedades y brindan refugio a la fauna local (Tovar, 2007). Es importante destacar que plantar y mantener árboles en zonas urbanas requiere de actividades de mantenimiento que incluyen; riego, poda, cuidado de la salud de las plantas y el manejo de los residuos generados por éstas. Los costos varían dependiendo del tamaño, la especie y ubicación de los árboles (Lilly, 2011).

El ambiente urbano es muy diferente del entorno natural al que se adaptan los árboles, pero debe proporcionar los mismos recursos para mantener un equilibrio saludable entre la copa y el sistema de raíces (Watson, Hewitt, Custic y Lo, 2014). Los árboles en medios urbanos están sometidos a condiciones modificadas y en algunos casos no deseables. Por esta razón, el periodo post-plantación de un árbol en ambiente urbano es de vital importancia para su supervivencia (Gilbertson, & Bradshaw, 1990), aunque existen pocos estudios en el país sobre los factores o relaciones que en última instancia contribuyen a la mortalidad o supervivencia de los árboles en un entorno urbano (Lu *et al*., 2010).

La supervivencia, el crecimiento y la salud de los árboles jóvenes en ambientes urbanos puede reducirse por varios factores, entre los cuales el suelo compacto y riego insuficiente son las afectaciones más frecuentes (Roman *et al*., 2015). Cabe resaltar que el abasto de agua es la clave para la supervivencia de árboles recién plantados, éste debe realizarse cuando se necesite, es preferible un riego lento que empape poco a poco el cepellón (Lilly, 2011); sin embargo, debe

ajustarse a la especie de árbol, el tipo de suelo y su drenaje. Por otra parte la compactación del suelo puede generar reducciones severas de aireación, reducir la porosidad y retención del agua afectando el crecimiento de las raíces de los árboles (Baldini & Alfaro, 2004). Si bien una nueva plantación puede establecerse después de una reducción en el nivel de oxígeno, los suelos que no están bien aireados contienen raíces más gruesas, más cortas, distorsionadas y con menos pelos radiculares disminuyendo así la capacidad de una raíz para crecer y penetrar en el suelo (Schnelle, Feucht & Klett, 1989).

La mayoría de las raíces se encuentran en la parte superior del suelo y aquellas esenciales para absorber agua y nutrimentos están incluso más allá de la línea de goteo (Schnelle *et al.*, 1989). Las principales funciones de las raíces son suministrar agua y minerales, almacenan alimento de reserva, sintetizan algunas hormonas de crecimiento y se encargan de anclar físicamente los árboles en el suelo (Kozlowski & Pallardy, 1997). La importancia del estudio de las raíces radica en que de ellas dependen las plantas para obtener nutrimentos y agua (Gregory & Kirkegaard, 2017) y que los patrones de crecimiento de las raíces de los árboles urbanos difieren considerablemente de individuos similares en ambientes forestales o agrícolas debido en gran medida a las diferentes características de los suelos (Day, Wiseman, Dickinson & Harris, 2010a). Por ejemplo, en ambientes urbanos el entorno subterráneo es a menudo restrictivo para el crecimiento de las raíces de los árboles, por lo cual se ha buscado entender cómo se desarrollan y responden los sistemas radicales y cómo las características subterráneas del medio urbano como el relieve, las estructuras de las construcciones y los tipos de suelo interactúan con las raíces de los árboles (Day, Wiseman, Dickinson & Harris, 2010b).

Las buenas prácticas en la preparación del sitio, la elección de especies adecuadas, la selección de árboles de calidad y el cuidado intensivo de los árboles durante la fase de establecimiento, son particularmente importantes para la plantación exitosa de árboles urbanos (Pauleit *et al.,* 2002). Es por esto que la

presente contribución aborda algunos problemas relacionados con el crecimiento radical de árboles de ahuehuete (*Taxodium mucromnatum* Ten.) en un área urbana y tiene como objetivo central identificar el efecto de la frecuencia de riego y la descompactación del suelo circundante de plantación sobre el crecimiento radical de árboles jóvenes, a través de una ventana de observación (rizotrón), la cual permite monitorear el crecimiento del sistema de raíces de los arboles durante un año de crecimiento.

1.1 Objetivos

General

- Identificar el efecto de la frecuencia de riego y la descompactación del suelo circundante de la cepa de plantación, sobre el crecimiento radical de árboles *Taxodium mucronatum* Ten. plantados en un área urbana.

Particulares

- Evaluar árboles de ahuehuete (2 m de altura) en condiciones urbanas bajo dos frecuencias de riego (frecuente y espaciado) y compactación del suelo (descompactado y no descompactado)

- Determinar el crecimiento del sistema radical de los arboles durante un año de crecimiento, a través de una pared transparente (rizotrón) y análisis de fotografías digitales.

1.2 Literatura citada

Baldini, A. & Alfaro, W. (2004). Ground Preparation. In: Burley, J., Evans, J., & Youngquist, J. A. Eds (2004). *Encyclopedia of forest sciences*. Elsevier.

Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010a). Tree root ecology in the urban environment and implications for a sustainable rhizosphere. *Arboriculture & Urban Forestry*, *36*(5), 193–205.

Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010b). Contemporary concepts of root system architecture of urban trees. *Arboriculture & Urban Forestry, 36*(4), 149-159.

Gilbertson, P., & Bradshaw, A. D. (1990). The survival of newly planted trees in inner cities. *Arboricultural Journal,* 14(4), 287–309. http://doi.org/10.1080/03071375.1990.9746850

Gregory, P. J., & Kirkegaard, J. A. (2017). Growth and Function of Root Systems. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (2a Ed., Vol. 1, pp. 230–237). Elsevier. http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00127-1

Kozlowski, T. & Pallardy S. (1997). Physiology of Woody Plants (2a ed.). San Diego, California: Academic Press.

Lilly, J. S. (2011). Guía de estudio para la certificación del arbolista (3ª ed.). Sociedad Internacional de Arboricultura. Champaing, IL: Premier Print Group.

Lu, J. W. T., Svendsen, E. S., Campbell, L. K., Greenfeld, J., Braden, J., King, K. L., & Falxa-Raymond, N. (2010). Biological, social and urban design factors affecting young street tree mortality in New York City. *Cities and the Environment*, *3*(1), 1–15.

Pauleit, S., Jones, N., Garcia-Martin, G., Garcia-Valdecantos, J. L., Rivière, L. M., Vidal-Beaudet, L. & Randrup, T. B. (2002). Tree establishment practice in towns and cities – Results from a European survey. *Urban Forestry & Urban Greening*, *1*, 83–96.

Roman, L. A., Walker, L. A., Martineau, C. M., Muffly, D. J., Macqueen, S. A., & Harris, W. (2015). Stewardship matters: Case studies in establishment success of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening, 14*(4), 1174–1182. http://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.001

Schnelle, M. A., Feucht, J. R., & Klett, J. E. (1989). Root systems of trees-facts and fallacies. *Journal of Arboriculture 15*(9), 201-205.

Tovar C., G. (2007). Manejo del arbolado urbano en Bogotá. *Territorios 16*(17), 149- 174.

Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014). The management of tree root systems in urban and suburban settings II : A review of strategies to mitigate human impacts. *Arboriculture & Urban Forestry, 40*(5), 249–271.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El arbolado urbano

En el medio urbano, el cultivo y manejo de árboles se denomina arboricultura y el término arborización se aplica a la plantación de árboles y arbustos en las ciudades (Gobierno del Distrito Federal, 2000). Los árboles siempre han sido parte de las ciudades, posiblemente desde la fundación de las mismas (Miller, 1988). Incluso son considerados un elemento fundamental en el paisaje de una ciudad ya que brindan diversos beneficios; controlan la contaminación, regulan la temperatura, brindan protección contra el viento, controlan la erosión, forman sitios de recreación, aporte cultural y simbólico, además de aumentar el valor de las propiedades y brindar refugio a la fauna local (Tovar, 2007).

Las plantaciones de árboles en ciudades son diferentes a las establecidas en sitios naturales, las combinaciones inusuales de factores ambientales y el aislamiento físico de los árboles son las principales diferencias (Clark & Kjelgren 1990). Es por esto que al establecer árboles en medio urbanos se tienen que considerar varios factores como son la selección ideal del árbol, identificar el objetivo de la plantación, las condiciones del sitio de plantación, el espaciamiento entre árboles así como las técnicas de plantación utilizadas y los cuidados posteriores de mantenimiento (Alvarado, Becchi & Devia, 2014; Gobierno del Distrito Federal, 2000).

2.2. Problemática de los árboles urbanos

Los árboles en el entorno urbano a menudo fracasan o, en el mejor de los casos, simplemente sobreviven (Urban, 1989). Malas prácticas en el establecimiento y mantenimiento son las principales causas del fracaso de los árboles en las ciudades. Las plantaciones nuevas requieren de diversos cuidados post plantación, siendo el riego inicial el de mayor importancia (Lell, 2006; Lilly, 2011), esto se debe a que la falta de humedad suficiente en el suelo obstaculiza la absorción de agua, lo que llega a causar la muerte de los árboles recién plantados (Kozlowski, 1987).

Generalmente, el entorno urbano es limitante para el desarrollo de los árboles urbanos (Johnston & Hirons, 2014; Watson, Hewitt, Custic & Lo, 2014b), el pavimento circundante o la infraestructura urbana limitan su crecimiento; bajo tales condiciones, a menudo la humedad del suelo es limitada debido a la compactación del suelo o al volumen restringido del mismo (Degaetano, 2000), debido a esto los árboles pueden sufrir déficit hídrico. Por ejemplo, la principal causa de muerte de los árboles establecidos en la ciudad de Liverpool, Inglaterra, después de tres años de plantados, es en gran medida un fenómeno fisiológico (estrés por sequía) y no atribuible a factores físicos como el vandalismo (Gilbertson & Bradshaw, 1990).

Los recursos que proporciona un suelo favorable para el crecimiento de las raíces incluyen oxígeno, niveles de agua y elementos minerales adecuados, resistencia a la penetración no limitante, intervalo de pH aceptable y actividad biológica vigorosa (Watson, *et al*., 2014b). La alteración de las condiciones del suelo puede limitar el crecimiento y el desarrollo de las raíces (Kozlowski, 1999), es por esto que todos los recursos del suelo suelen ser considerados en la plantación y el manejo de árboles en zonas urbanas (MacDonald, Costello, Lichter, & Quickert, 2004).

La mortalidad de los árboles es relativamente alta durante la fase de establecimiento y durante los primeros años después de la plantación (Roman *et al.,* 2015). El éxito del establecimiento de nuevas plantaciones depende de una secuencia de acciones, desde el tipo de propagación y producción del árbol, técnica de cosecha, formas de transporte, técnicas de plantación o transplante y los cuidados posteriores que se le brinden a los árboles (Struve, 2009). Diversos estudios señalan que la supervivencia de los árboles recién plantados se debe principalmente al suministro de riegos adecuados (Lell, 2006; Lilly, 2011). Por ejemplo, el crecimiento de *Tilia cordata* Mill. aumentó al incrementar la cantidad de agua disponible (Bühler, Kristoffersen & Larsen, 2006), y el crecimiento de encinos recién plantados fue casi dos veces más rápido cuando se les suministro riegos frecuentes (Gilman, 2004). Este tipo de resultados pueden suscitarse debido a que el contenido de agua en el suelo requerido para los árboles puede ser de hasta un 40% (Coder, 2000).

2.3. Estudio de las raíces de los árboles urbanos

El sistema radical de los arboles está compuesto por raíces absorbentes, raíces de transición y raíces conductoras (Baldini, 1992). La composición y función de las raíces y brotes son diferentes, pero ambas estructuras deben trabajar juntas para que una planta funcione y crezca (Gregory & Kirkegaard, 2017), es por esto que la supervivencia de árboles en condiciones urbanas desfavorables depende mayoritariamente de la capacidad de la raíz para restablecer la actividad fisiológica y mantener el nivel de reservas energéticas (Levitt, 1980). El estudio de las raíces frecuentemente se realiza de manera destructiva, lo que limita la posibilidad de saber más sobre su fisiología, ecología y estructura arquitectónica (Guedea-Fernandez, Arriaga-Frías & De la Cruz-Guzmán, 2001).

Para realizar la investigación del sistema radical de los árboles se ha utilizado diversos métodos; por ejemplo Schuurman y Goedewaagen (1971) describen cinco técnicas para el estudio de las raíces, entre los cuales se encuentran los métodos de estudio en contenedores. En estos últimos se menciona el uso de cilindros de diversos materiales, cajas de madera, asbesto, concreto y cajas con paneles de vidrio. En años más recientes se ha utilizado el radar de penetración al suelo como una técnica para estudiar y mapear sistemas de raíces de los árboles urbanos *in situ* (Stoke *et al.,* 2002). Algunas otras metodologías utilizadas son la conductancia eléctrica y las excavaciones de raíces con corrientes de aire ultrasónicas (Nadezhdina & Cermák, 2003).

A través del tiempo el estudio de las raíces de los árboles urbano ha abarcado diversos aspectos, uno de los más estudiados es el efectos la compactación del suelo debido a que las raíces no pueden crecer donde el suelo es compacto y difícil de penetrar (Perry, 1982; Hascher & Wells, 2007; Watson *et al.*, 2014a). Por otro lado, para mitigar los efectos de la compactación se han utilizado diversos métodos, como el inyector al suelo Terraventen®. Al usar este tipo de productos en árboles *Acer rubrum* L. no se obtuvieron efectos estimulantes en el crecimiento de raíces finas (Hascher & Well, 2007). Otra forma de combatir los suelos compactos ha sido utilizando mejoradores de suelo de relleno como los residuos de jardinería composteada pero sin obtener los mejores resultados (Gilman, 2004, Smiley, Calfee, Fraedrich & Smiley, 2006).

Consecuencia de la compactación del suelo es la reducción del nivel de oxigeno disponible para las raíces (Kozlowski, 1999). Una mala aireación de las raíces puede generar estrés en los árboles urbanos (Costello, MacDonal, & Jacobs, 1990). Por ejemplo, las raíces de los géneros *Gleditsia, Koelreuteria, Quercus y Zelkova* se desarrollan mejor cuando las concentraciones de oxígeno en el suelo son mayores (D'Amato, Sydnor, Hunt y Bishop, 2002b), para mejorar los niveles de oxígeno se han utilizado tubos de aireación enterrados en suelo compacto

(MacDonald *et al.,* 2004) y se recomienda enterrar varillas de acero como un método rápido para conocer el nivel de aireación del suelo (Watson, 2006).

Otro de los factores importantes en los estudios de raíces es la aplicación de riego, debido a que el nivel de humedad del suelo no siempre es el ideal para la máxima absorción de las raíces (Kozlowski, 1987). El riego puede elevar el contenido de agua del suelo y contribuir al crecimiento de los árboles (Nielsen, Bühler & Kristoffersen, 2007). Este efecto se ha comprobado en arbustos regados con el 100% de evapotranspiración de referencia (Montague, McKenney, Maurer & Winn, 2007), así como en el crecimiento de *Tilia cordata* que aumenta al aumentar la cantidad de agua de riego disponible (Bühler *et al.,* 2006). Diversos estudios han analizado los efectos del riego sobre diferentes especies arbóreas contribuyendo a mejorar la supervivencia y crecimiento de árboles en condiciones urbanas (Costello, Jones & Mccreary, 2005; Dagaetano, 2000; Gilman, Grabosky, Stodola & Marshall, 2003; Gilman *et al*., 2009).

Otros estudios se han enfocado en el crecimiento del sistema radical posterior al transplante (Day & Harrys, 2008; Mohedano, 2005; Solfjeld & Pedersen, 2006) y en algunos casos se ha estudiado la decoloración y decaimiento de las raíces de los árboles urbanos (Watson, 2008), esto debido a que la salud y longevidad de las raíces de los árboles en entornos urbanos son afectadas por las actividades humanas; un sistema radical reducido o en constricción disminuye la estabilidad y aumenta el estrés de los árboles (Watson *et al.*, 2014b).Todos estos estudios han ayudado a la comprensión de las interrelaciones físicas, químicas y biológicas del suelo ya que proporcionar al árbol un entorno urbano que funcione como el medio ambiente natural es el objetivo principal al realizar el manejo del arbolado urbano (Watson *et al.,* 2014a).

2.4. El rizotrón y su uso en el estudio de las raíces

El rizotrón se crea ante la necesidad de obtener más información sobre el crecimiento dinámico del sistema de raíces de las plantas (Böhm, 1979). Guedea-Fernández *et al.* (2001) definen rizotrón como "*un instrumento o estructura que sirve para realizar mediciones y observaciones del sistema radical de las plantas, a través de superficies transparentes, siendo susceptible este sistema para practicar estudios de naturaleza experimental trátese de árboles o bien de herbáceas".* La forma de los rizotrones es variable y se han desarrollado varios modelos (Busch, Mendelssohn, Lorenzen, Brix & Miao, 2006; James, Bartlett & Amadon, 1985; Guedea-Fernández *et al.,* 2001; Silva & Beeson 2011; Harris, Bassuk & Whitlow, 1994). Por ejemplo un modelo en forma de estrella con ocho ventanas de observación de raíces permite optimizar su uso con plantas leñosas maduras (Silva & Beeson 2011), por lo tanto los rizotrones permiten medir la longitud radical y el número de raíces (Smit, George & Groenworld, 2000) asegurando el estudio del sistema radical de forma no destructiva.

Los rizotrones han permitido estudiar la colonización y movimiento del hongo *Phymatotrichopsis omnivora* (Duggar) Hennebert a través de raíces y suelo de árboles de manzano (Todd-Watson *et al*., 2007). Por otra parte la caracterización del crecimiento radical de *Vaccinium meridionale* Swart. ha sido estudiada con rizotrones (Medina, Lobo, Colorado & Cardona, 2015), inclusive el uso de éste instrumento permitió el análisis del crecimiento de raíces de palma de aceite considerándose una buena alternativa para el estudio del crecimiento radical de las plantas (Hormaza & Romero, 2007).

En ambientes naturales y plantaciones forestales los rizotrones se han usado de manera reducida, por ejemplo, Thongo *et al.* (2008) utilizaron rizotrones para estudiar la dinámica de crecimiento de raíces finas en plantaciones de *Eucalytus* en República del Congo, en relación a la estacionalidad de la lluvia, mientras que Zang *et al.* (2014) plantaron árboles jóvenes de haya (*Fagus sylvatica* L.) en rizotrones que fueron colocados en un claro de un bosque de abeto noruego (*Picea abies* Karst.) en Alemania, los árboles fueron sometidos a diferentes niveles de estrés por sequía. Estos árboles fueron sensibles a los niveles de poca humedad; cuando existe una sequía moderada, el crecimiento de raíces finas aumentó, pero disminuyó notablemente en los árboles que sufrieron sequia severa, en conclusión, las raíces finas de esta especie son más efectivas cuando existe poca humedad en el suelo sin llegar a una condición de sequía severa.

El sistema radical de varias especies de árboles en ambientes urbanos ha sido estudiado a través de rizotrones; mediante el uso de éste instrumento se han evaluado la longitud de raíz, la extensión de las raíces individuales y la aparición de nuevas raíces de *Fraxinus pennsylvanica* Marsh, *Quercus coccinea* Muenchh, *Corylus colurna* L. y Syringa *reticulata* (Blume) Hara 'Ivory Silk' (Harris, Bassuk, Zobel y Whitlow, 1995). El uso del rizotrón permite estimar diferentes patrones de crecimiento radical de acuerdo al tipo de raíces que se midan. Por otro lado, el crecimiento radical de *Prunus serrulata* Lindl. y *Ulmus parvifolia* Jacq. plantados en pavimento sobre suelo compacto y no compacto fue medido a través de rizotrones (Smiley *et al.,* 2006) permitiendo determinar que el pavimento sobre suelo no compactado mostro un mejor crecimiento y salud de los árboles. En este aspecto, Chacalo *et al*. (2000) menciona que las raíces de *Fraxinus udhei* (Wenz.) Lingelsh. se desarrollan mejor en los suelo de textura fina, mientras que el sistema radical de las especies de *Quercus* crecen con mayor dificultad en suelos de textura gruesa, el monitoreo del crecimiento de las raíces se realizó con pequeños rizotrones.

La tasa de extensión de raíces puede ser estimada con rizotrones, por ejemplo Solfjeld y Pedersen (2006) midieron el crecimiento de la raíz de *Betula pendula* Roth. establecidos en dos épocas de transplante en un clima nórdico. En el caso del crecimiento de raíces de *Acer saccharum* Marsh producidos de dos formas en vivero, árboles en arpilla y en contenedores fue determinado con rizotrones, los arboles trasplantados del sistema de producción en contenedores alteran los patrones típicos de producción y mortalidad de las raíces (Richardson-Calfee, Harris, Jones & Fanelli, 2010). De tal manera, los rizotrones pueden ser usados para investigar el efecto de diversos factores sobre en el crecimiento de las raíces (Silva & Beeson, 2011), permiten realizar mediciones repetidas de la misma zona radical y determinar diferencias en el enraizamiento de las plantas (McMichael, Upchurch & Taylor, 1992).

2.6. *Taxodium mucronatum* Ten.

Taxodium mucronatum Ten. es un árbol considerado símbolo mexicano y en 1921 fue designado como el Árbol Nacional de México (Comisión Nacional Forestal, 2016). Es conocido comúnmente como ahuehuete o sabino y es utilizado como planta de sombra y ornato en parques y jardines (Comisión Nacional Forestal & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2011). Es un árbol que alcanza hasta 50 m de altura, de crecimiento lento, su corteza presenta tiras longitudinales de color gris o café grisácea y se le atribuyen usos medicinales junto con las hojas (Benitez, Pulido & Equihua, 2004). Prefiere climas semicálidos aunque se adapta a los templados, prefiere suelos ácidos y húmedos con exposición soleada, no tolera la sombra, requiere riego en abundancia, de raíz profunda y se recomienda plantar a una distancia de 12 m entre individuos (Martínez & Chacalo, 1994).

Si bien varios autores reportan al ahuehuete como una especie que requiere agua en abundancia, existen registros que destacan su resistencia a largos periodos secos (Carranza, 1992; Martínez, 1963; Villanueva *et al*., 2003). Un estudio

reciente demuestra que *Taxodium* es un género monotípico con tres variedades, *T. distichum* var distichum (L.) Rich, *T. distichum* var. imbricarium (Nutt.) Croom y *T. distichum* var. mexicanum (Carr.) Gord. (Adams, Arnold, King, Denny & Creech, 2012); sin embargo, en esta investigación se seguirá usando *Taxodium mucronatum* Ten. como sinonimia de *T. distichum* var mexicanum (Carr) Gord.

El estudio de las raíces del género *Taxodium* en ambiente urbano es escaso; sin embargo, las relaciones micorricicas de *Taxodium mucronatum* Ten han sido estudiadas, encontrando que sus raíces son colonizadas por micorrizas de tipo arbuscular en raíces finas de un diámetro promedio de 0.09 cm (Sylvia, Alagely, Kent & Mecklenburg, 1998). La tolerancia al medio urbano del ahuehuete no se ha demostrado y es posible que sus raíces no levanten aceras (Gilman & Watson, 1994); no obstante, *Taxodium distichum* L. produjo mayor número de raíces en una prueba de crecimiento potencial de raíz, en comparación *con Fraxinus americana* L*, Celtis occidentalis* L. *y Querus* spp (Ellison, Schutzki, Nzokou & Cregg, 2016).

2.7. Literatura citada

Adams, R. P., Arnold, M. A., King, A. R., Denny, G. C., & Creech, D. (2012). *Taxodium* (cupressaceae): one, two or three species? evidence from DNA sequences and terpenoids. *Phytologia, 94*(2), 159–168

Alvarado O., F., Becchi G., F., & Devia C., S. (2014). Manual de plantación de árboles en áreas urbanas. Santiago de Chile: Editorial e Imprenta Maval Ltda.

Baldini, E. (1992). Arboricultura general. España: Editorial Mundi-Prensa.

Benitez, B. G., Pulido S. T., Equihua, Z. M. (2004). Árboles multiusos nativos de Veracruz para reforestación, restauración y plantaciones. Veracruz, México; Instituto de Ecología, A. C.

Böhm, W. (1979). Methods of studying root systems. Berlín: Springer-Verlag.

Bühler, O., Kristoffersen, P. & Larsen, S. U. (2006). Growth and phenology of established *Tilia cordata* street trees in response to different irrigation regimes. *Arboriculture and Urban Forestry, 32*(1), 3–9.

Busch, J., Mendelssohn, I. A., Lorenzen, B., Brix, H., & Miao, S. (2006). A rhizotron to study root growth under flooded conditions tested with two wetland Cyperaceae. *Flora*, *201*, 429–439. http://doi.org/10.1016/j.flora.2005.08.007

Carranza, E. (1992). Taxodiaceae. In: J. Rezedowski, G. Calderón de Rezedowski. *Flora del Bajío y de regiones adyacentes*. Instituto de Ecología, A.C. Centro Regional del Bajío, Fascículo 4. 1-7

Chacalo, A., Watson, G., Bye, R., Ordaz, V., Aldama, A., & Vazquez, J. (2000). Root growth of *Quercus crassiflolia, Q. crassipes,* and *Fraxinus uhdei* in 2 different soil types. *Journal of Arboriculture, 26*(1), 30–37.

Clark, J. R., & Kjelgren, R. (1990). Water as a limiting factor in the development of urban trees. *Journal of Arboriculture, 16*(8), 203–208.

Coder, K. D. (2000). Tree root growth requirements. Consultado en: http://rootcauseseattle.com/wp-content/uploads/2015/05/article-tree-root-growth-requirements.pdf.

Comisión Nacional Forestal. (2016). El árbol nacional. Consultado en: https://www.gob.mx/conafor/articulos/el-arbol-nacional?idiom=es.

Comisión Nacional Forestal & Comisión Nacional el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2011). *Taxodium mucronatum* Ten. Consultado en http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/1011Taxodium%20mucronatum.pdf

Costello, L. R, Jones, K. S., & Mccreary D, D. (2005). Irrigation effects on the growth of newly planted oaks (*Quercus* spp.). *Journal of Arboriculture, 31*(2), 83–88.

Costello, L. R., MacDonal, J. D., & Jacobs, K. A. (1990). Soil Aeration and Tree Health: correlating soil oxygen measurements with the decline of established oaks. Consultado en https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr126/psw_gtr126_05_costello.pdf

Day, S. D., & Harris, J. R. (2008). Growth , survival , and root system morphology of deeply planted Corylus colurna 7 years after transplanting and the effects of root collar excavation. *Urban Forestry & Urban Greening*, *7*, 119–128. http://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.12.004

D'Amato, N. E., Sydnor, T. D., Hunt, R., & Bishop, B. (2002a). Root growth beneath sidewalks near trees of four genera. *Journal of Arboriculture, 28*(6), 283–290.

D'Amato, N. E., Sydnor, T. D., Knee, M., Hunt, R., & Bishop, B. (2002b). Which comes first, the root or the crack? *Journal of Arboriculture, 28*(6), 277–282.

Degaetano, A. T. (2000). Specification of soil volume and irrigation frequency for urban tree containers using climate data. *Journal of Arboriculture, 26*(3), 142–151.

Ellison, D. S., Schutzki, R., Nzokou, P., & Cregg, B. (2016). Root growth potential, water relations and carbohydrate status of ash alternative species following pre-plant storage. *Urban Forestry & Urban Greening*, *18*, 59–64. http://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.05.001

Gilbertson, P., & Bradshaw, A. D. (1990). The survival of newly planted trees in inner cities. *Arboricultural Journal, 14*(4), pp. 287–309. doi: doi.org/10.1080/03071375.1990.9746850

Gilman, E. F. (2004). Effects of amendments, soil additives, and irrigation on tree survival and growth. *Journal of Arboriculture, 30*(5), 301–304.

Gilman, E. F., Grabosky, J., Stodola, A., & Marshall, M. D. (2003). Irrigation and container type impact red maple (Acer rubrum L.) 5 years after landscape planting. *Journal of Arboriculture*, *29*(4), 231–235.

Gilman, E. F. & Watson, D. G. (1994). *Taxodium mucronatum* Montezuma Baldcypress. Consultado en: http://hort.ufl.edu/database/documents/pdf/tree_fact_sheets/taxmuca.pdf

Gilman, E. F., Wiese, C. L., Paz, M., Shober, A. L., Scheiber, S. M., Moore, K. A., & Brennan, M. (2009). Effects of Irrigation Volume and Frequency on Shrub Establishment in Florida. *Journal of Environmental Horticulture*, *27*(3), 149–154.

Gobierno del Distrito Federal. (2000). Manual técnico para la poda, derribo y transplante de árboles y arbustos de la Ciudad de México. Consultado en http://www.arboricultura.org.mx/wp-content/uploads/2013/01/manual-tecnico-para-la-poda-derribo-y-transplante-de-arboles-y-arbustos-de-la-ciudad-de-mexico-2000.pdf

Guedea-Fernández, G., Arriaga-Frías, A., & De la Cruz-Guzmán, G. (2001). El efecto de maceta y el rizotrón: una herramienta para la investigación y docencia. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente, 7*(2), 115–121.

Gregory, P. J., & Kirkegaard, J. A. (2017). Growth and function of root systems. In: Murphy D. J., Thomas B., Murray B. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences.* (2a Ed., pp. 230–237). Oxford: Elsevier. http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00127-1

Harris, J. R., Bassuk, N. L., & Whitlow, T. H. (1994). A Window Into Below-ground Growth of Landscape Trees: Implications for Transplant Success. *HortTechnology,* 4, 368–371.

Harris, J. R., Bassuk, N. L., Zobel, R. W., & Whitlow, T. H. (1995). Root and shoot growth periodicity of green ash, scarlet oak, turkish hazelnut, and tree lilac. *Journal of American Society for Horticultural Science*, *120*(2), 211–216.

Hascher, W. & Wells, C. E. (2007). Effects of soil decompaction and amendment on root growth and architecture in red maple (*Acer rubrum*). A*rboriculture & Urban Forestry, 33*(6), 428–432.

Hormaza, P., & Romero, H. M. (2007). Utilización de rizotrones para el estudio de la dinámica del crecimiento de raíces de palma de aceite. *Cenipalma*, Colombia.

Johnston, M., & Hirons, A. (2014). Urban trees. In G. R. Dixon & D. E. Aldous (Eds.), *Horticulture: Plants for people and places, Volume 2* (pp. 693–711). Dordrecht: Springer.

James, B. R., Bartlett, R. J., & Amadon, J. F. (1985). A root observation and sampling chamber (rhizotron) for pot studies. *Plant and Soil*, *85*(June 1985), 291–293. http://doi.org/10.1007/BF02139633

Kozlowski, T. T. (1999). Research soil compaction and rrowth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *14*(6), 596–619.

Kozlowski, T. T. (1987). Soil mositure and absorption of water by tree roots. *Journal of Arboriculture*, *13*(2), 39–46.

Lell, J. (2006). Arbolado urbano. Implantación y cuidados de árboles para veredas. Buenos Aires, Argentina: Orientación Gráfica Editora.

Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stress. New York, USA: Academic Press.

Lilly J. S. (2011). Guía de estudio para la certificación del arbolista (3ª ed). Sociedad Internacional de Arboricultura. Champaing, IL: Premier Print Group.

MacDonald, J. D., Costello, L. R., Lichter, J. M., & Quickert, D. (2004). Fill Soil effects on soil aeration and tree growth. *Journal of Arboriculture, 30*(1), 19–27.

McMichael, B. L., Upchurch, D. R., & Taylor, H. M. (1992). Transparent wall techniques for studying root growth and function in soil. *Journal of Plant Nutrition,* 15(6–7), 753–762. http://doi.org/10.1080/01904169209364360

Martínez, M. 1963. Las Pináceas Mexicanas (3 ed). México, D.F: Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.

Martínez, G. L. & Chacalo H. A. (1994). Los árboles de la ciudad de México. Universidad Autónoma Metropolitana–Unidad Azcapotzalco. México, D. F.

Medina, C. I., Lobo, A. M., Colorado, A. Á., & Cardona, L. E. (2015). Análisis del desarrollo de plantas de mortiño (*Vaccinium meridionale* Swart.) bajo dos sistemas de propagación : clonal y sexual. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*, *16*(1), 65–77.

Miller R. W. (1988). Urban Forestry. Planning and managing urban greenspaces. New Jersey, USA: Pentice –Hall.

Mohedano C., L. (2005). Estrés posttrasplante de árboles de *Pinus greggii* Engel., plantados en un área urbana con suelo salino. (Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México).

Montague, T., McKenney, C., Maurer, M., & Winn, B. (2007). Influence of irrigation volume and mulch on establishment of select shrub species. *Arboriculture and Urban Forestry*, *33*(3), 202–209.

Nadezhdina, N., & Cermák, J. (2003). Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. *Journal of Experimental Botany*, *54*(387), 1511–1521. http://doi.org/10.1093/jxb/erg154

Nielsen, C. N., Bühler, O., & Kristoffersen, P. (2007). Soil water dynamics and growth of street and park trees. *Arboriculture and Urban Forestry*, *33*(4), 231–245

Perry, T. O. (1982). The ecology of tree roots and the practical significance thereof. *Journal of Arboriculture*, *8*(8), 197–211.

Richardson-Calfee, L. E., Harris, J. R., Jones, R. H., & Fanelli, J. K. (2010). Patterns of root production and mortality during transplant establishment of landscape-sized sugar maple. *Journal of the American Society for Horticultural Science, 135*(3), 203–211.

Roman, L. A., Walker, L. A., Martineau, C. M., Muffly, D. J., Macqueen, S. A., & Harris, W. (2015). Stewardship matters : Case studies in establishment success of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening, 14*(4), 1174–1182. http://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.001

Schuurman, J. J. & Goedewaagen, M. A. J. (1971). Methods for the examination of root systems. Wageningen, Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation.

Silva, D. D., & Beeson, R. C. (2011). A large-volume rhizotron for evaluating root growth under natural-like soil moisture conditions. *HortScience, 46*(12), 1677–1682.

Smiley, E. T., Calfee, L., Fraedrich, B. R. & Smiley, E. J. (2006). Comparison of structural and noncompacted soils for trees surrounded by pavement. *Arboriculture and Urban Forestry, 32*(4), 164–169.

Smit, A. L., George, E. & Groenworld J. (2000). Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil. *In*: A. L. Smit, A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, & S. C. van de Geijn, Eds. (2000). *Root methods: a handbook*. Berlin: Springer-Verlag.

Solfjeld, I., & Pedersen, P. A. (2006). Growth of *Betula pendula* Roth the first season after transplanting at two phenological stages. *Urban Forestry & Urban Greening, 5*(2006), 101–106. doi: doi.org/10.1016/j.ufug.2006.05.002

Stoke, A., Fourcaud, T., Hruska, J., Cermak, J., Nadyezdhina, N., Nadyezhdin, V., & Praus, L. (2002). An evaluation of direfent methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar. *Journal of Arboriculture, 28*(1), 2–10.

Struve, D. K. (2009). Tree establishment: A review of some of the factors affecting transplant survival and establishment. *Arboriculture and Urban Forestry, 35*(1), 10–13.

Sylvia, D., Alagely, A., Kent, D., & Mecklenburg, R. (1998). Mycorrhizae of landscape trees produced in raised beds and containers. *Journal of Arboriculture, 24*(6), 308–315.

Todd-Watson, W., Nye-Appel, D., Aloysius-Arnold, M., Miller-Kenerley, C., Lester-Starr, J., & Martínez-Trinidad, T. (2007). Inoculación, síntomas, y colonización en árboles de manzano en contenedor por *Phymatotrichopsis omnivora* (Duggar) Hennebert. *Agrociencia*, *41*, 459–468.

Tovar C., G. (2007). Manejo del arbolado urbano en Bogotá. *Territorios 16*(17), 149- 174.

Thongo M., A., Jourdan, C., Deleporte, P., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J., Epron, D. (2008). Root elongation in tropical Eucalyptus plantations: effect of soil water content. *Annals of Forest Science*, *65*, 7. http://doi.org/10.1051/forest:2008038

Urban, J. (1989). New Techniques in urban tree plantings. *Journal of Arboriculture, 15*(11), 281–284.

Villanueva D. J., Stahle D.W., Therrell M. D., Cleaveland M. K., Camacho M. F., Núñez Díaz D, P., Gómez C. S., Sánchez S. J. & Ramírez G. J. A.. (2003). Registros climáticos de los ahuehuetes de Chapultepec en los últimos 450 años. *Boletín del Archivo Histórico del Agua (8)*: 34-43.

Watson, G. (2006). Establishing a relationship between soil aeration and fine root development of seven tree species using the steel rod technique. *Arboricultural Journal, 29*(3), 161–171. doi.org/10.1080/03071375.2006.9747456

Watson, G. (2008). Discoloration and decay in severed tree roots. *Arboriculture & Urban Forestry, 34*(4), 260–264.

Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M. & Lo, M. (2014a). The management of tree root systems in urban and suburban settings: A review of soil influence on root growth. *Arboriculture & Urban Forestry 40*(4), 193–217

Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014b). The management of tree root systems in urban and suburban settings II : A review of strategies to mitigate human impacts. *Arboriculture & Urban Forestry, 40*(5), 249–271.

Zang, U., Goisser, M., Häberle, K., Matyssek, R., Matzner, E., & Borken, W. (2014). Effects of drought stress on photosynthesis, rhizosphere respiration, and fine-root characteristics of beech saplings : A rhizotron field study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *177*, 168–177.

CAPÍTULO 3. CRECIMIENTO RADICAL DE *Taxodium mucronatum* Ten. EN UN ÁREA URBANA

ROOTS GROWTH OF *Taxodium mucronatum* Ten. IN AN URBAN AREA

RESUMEN

El ahuehuete es considerado el Árbol Nacional de México, y se encuentra frecuentemente en áreas verdes urbanas; sin embargo, en estas condiciones la humedad restringida y la compactación del suelo influyen en su crecimiento y por lo tanto en el éxito de la arborización. El objetivo de esta investigación fue identificar los efectos de la frecuencia de riego y la descompactación del suelo circundante a la cepa de plantación sobre el crecimiento de las raíces de árboles jóvenes. Se plantaron 24 árboles de dos metros de altura en un área verde urbana, el crecimiento del sistema radical se monitoreó a través de fotografías digitales obtenidas de rizotrones, instalados en una pared de la cepa de plantación de cada árbol. La compactación original del sitio no presentó niveles restrictivos para el crecimiento, por lo tanto, aflojar el suelo circundante de plantación no mejoró significativamente el crecimiento radical. El análisis de varianza para longitud de raíz no mostró diferencias estadísticas significativas para los factores riego, suelo y su interacción. El número de raíces fue afectado por la interacción de los factores riego y suelo ($P= 0.0877$, $P\leq 0.1$); por tanto, árboles que fueron tratados con riego frecuente (una vez por semana) y plantados en suelo no descompactado desarrollaron mayor número de raíces (190) que su contraparte de riego espaciado (una vez cada dos semanas) en suelo no descompactado (75).

Palabras clave: *Taxodium mucronatum*, rizotrón, sistema de raíces, riego, compactación del suelo.

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Pablo Hernández López
Director de Tesis: Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo
Codirector de Tesis: Dr. Leopoldo Mohedano Caballero

ABSTRACT

ROOTS GROWTH OF *Taxodium mucronatum* Ten. IN AN URBAN AREA

The ahuehuete is considered the National Tree of Mexico and frequently found in urban green areas; however, under there conditions, restricted moisture and soil compaction influence tree growth and, therefore, the success of planting. The objective of this research was to identify the effects of frequency of irrigation and decompaction of the soil surrounding the planting hole on the growth of roots young trees. 24 trees two meters high were planted in an urban green area, the growth of the root system was monitored through digital photographs obtained from rhizotrons, installed in a wall of the planting hole of each tree. The original compaction of the site did not present restrictive levels for the growth, therefore, loosening surrounding soil of plantation did not improve the radical growth significantly. The analysis of variance for root length did not show significant statistical differences for irrigation, soil and their interaction. The number of roots was affected by the interaction of irrigation and soil ($P = 0.0877$, $P \leq 0.1$); therefore, trees that were treated with frequent irrigation (once a week) and planted in non-decompacted soil developed more roots (190) than their spaced irrigation counterpart (once every two weeks) in non-decompacted soil (75).

Key words: *Taxodium mucronatum*, rhizotron, root system, irrigation, soil compaction.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Pablo Hernández López
Advisor: Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo
Coadvisor: Dr. Leopoldo Mohedano Caballero

3.1. Introducción

El sistema radical de los árboles tiene como funciones principales absorber y conducir agua y minerales así como fijar el árbol al suelo (Raven, Evert & Eichorn 1986). Las raíces crecen continuamente, pero su proliferación depende de la disponibilidad de agua y minerales en su microambiente; de tal manera que la capacidad de las plantas para absorber estos dos recursos del suelo está relacionada con su capacidad para desarrollar un sistema radical extenso (Ludovici, 2004). Un sistema de raíces reducido, o en constricción, disminuye la estabilidad y aumenta el estrés de los árboles (Watson *et al*., 2014b).

En entornos urbanos los patrones de crecimiento de las raíces de los árboles se pueden diferenciar considerablemente de las especies similares en ambientes forestales o agrícolas (Day *et al.*, 2010a). Cuando el suelo urbano limita el enraizamiento de los árboles, la respuesta de las raíces a condiciones desfavorables es reducida (Watson *et al*., 2014a). Por ejemplo, suelo compacto, pH elevado, altas temperatura, baja humedad y presencia de contaminantes pueden alterar el crecimiento, morfología y fisiología de las raíces (Day *et al.*, 2010b). En este contexto el suelo compacto y riego insuficiente son las afectaciones más frecuentes que impiden el crecimiento radical de los árboles (Roman *et al*., 2015). Incluso la falta de humedad suficiente es considerada la principal causa de la muerte de los árboles recientemente plantados (Lell, 2006).

Existen varias metodologías para el estudio del desarrollo de raíces de los árboles (Bhöm, 1979; Nadezhdina & Cermák, 2003; Ryser, 2006; Stoke *et al.*, 2002), muchas de ellas son de naturaleza destructiva. En años recientes se han desarrollado instrumentos y métodos que permiten el estudio del sistema radical de una forma no destructiva. Por ejemplo, los radares de penetración del suelo (Stoke *et al.*, 2002), método de conductancia eléctrica diferencial o la excavación de raíces mediante corriente de aire ultrasónico (Nadezhdina & Cermák, 2003); sin embargo, existe otro instrumento llamado rizotrón, éste permite observar y

medir las raíces de las plantas de una manera no destructiva a través de superficies transparentes (Guedea-Fernandez *et al.*, 2001).

El diseño de los rizotrones es variable y se han desarrollado varios modelos (Busch, Mendelssohn, Lorenzen, Brix & Miao, 2006; James, Bartlett & Amadon, 1985; Guedea-Fernández *et al.,* 2001; Silva & Beeson 2011; Harris, Bassuk & Whitlow, 1994). Este instrumento ha sido utilizado para monitorear el crecimiento de las raíces de especies arbóreas como *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl*., Q. crassipes* Humb. & Bonpl y *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. en suelo de textura fina y gruesa (Chacalo *et al.*, 2000), también ha permitió el análisis del crecimiento radical de *Prunus serrulata* Lindl. y *Ulmus parvifolia* Jacq. con diferentes tratamientos al suelo *(*Smiley, Calfee, Fraedrich & Smiley, 2006), así como comparar el crecimiento de raíces de *Acer saccharum* Marsh, producidos de dos formas distintas en vivero (Richardson-Calfee, Harris, Jones y Fanelli, 2010).

La importancia de estudiar el desarrollo de las raíces radica en que de ellas dependen las plantas para obtener nutrimentos y agua (Gregory & Kirkegaard, 2017). Los árboles jóvenes plantados en suelos compactos y con poca humedad enfrentan problemas difíciles para extender su sistema de raíces y poder mantener un crecimiento adecuado (Craul, 1992), además la regeneración del sistema radical de árboles es clave para un establecimiento exitoso en entornos urbanos (Richardson-Calfee *et al*., 2010). Por lo anterior, esta investigación tiene como objetivo identificar el efecto de la frecuencia de riego y la descompactación del suelo circundante de plantación sobre el crecimiento radical de árboles jóvenes de ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.), a través de una ventana de observación (rizotrón), la cual permitió obtener imágenes digitales para monitorear el crecimiento del sistema de raíces durante un año de crecimiento.

3.2. Materiales y Método

3.2.1. Caracterización del sitio

La investigación se realizó en un terreno anexo a la planta tratadora de aguas residuales de la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, ubicada en las inmediaciones del punto geográfico 19° 29’ 46’’ N y 18° 00’ 51” O, a una altitud de 2,250 m. El suelo original del lugar fue sometido a alteraciones debido al establecimiento de un proyecto de área verde urbana con un lago artificial, dichas alteraciones consistieron en relleno, nivelación y ligera compactación de la zona con tierra agrícola de textura arcillosa.

3.2.2. Diseño experimental

El experimento se estableció como un diseño completamente al azar en arreglo factorial, con los factores: a) frecuencia de riego y b) tratamiento al suelo circundante de la cepa de plantación. La frecuencia de riego se dividió en dos niveles: riego frecuente, una vez a la semana (RF), y riego espaciado, una vez cada dos semanas (RE). El tratamiento al suelo circundante de la cepa de plantación también se dividió en dos niveles: suelo no descompactado (SND) y suelo descompactado (SD) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos del experimento

Tratamiento	Clave
Riego espaciado con suelo no descompactado	RE-SND
Riego espaciado con suelo descompactado	RE-SD
Riego frecuente con suelo no descompactado	RF-SND
Riego frecuente con suelo descompactado	RF-SD

La cantidad de agua utilizada para el riego se determinó con base en el parámetro evapotranspiración de referencia (ETo) de una semana (Allen, Pereira, Raes y Smith, 2006); para el cálculo de éste se utilizaron datos de temperatura, horas brillo solar, velocidad del viento y humedad relativa del periodo octubre del 2015 a septiembre del 2016, de la Estación Agrometeorológica de la Universidad Autónoma Chapingo. La determinación de la ETo se hizo a través del software ETO Calculator versión 3.1. El volumen promedio de agua obtenido fue de 38.5 l por árbol, que se suministraron de manera manual con ayuda de una cubeta de plástico.

Para la preparación de suelo descompactado (SD), después de ser plantados los árboles se procedió a aflojar los 15 cm posteriores a las paredes laterales de las cepas con ayuda de un bieldo común de cuatro dientes, alcanzando una profundidad de 25 cm. Para el caso de suelo no descompactado no se realizó ninguna acción aparte de abrir la cepa, con lo cual se mantuvo el nivel de compactación original. Díez días después de establecido el experimento se midió el grado de compactación en libras por pulgada cuadrada (PSI) con un medidor de compactación del suelo análogo marca Dickey-jhon® y se registró la profundidad de penetración. Los resultados se convirtieron a kilogramos por centímetro cuadrado por centímetro de profundidad (kg cm^{-2} cm).

3.2.3. Establecimiento del rizotrón

Para la evaluación del crecimiento radical se estableció en cada cepa de plantación una pared transparente de vidrio (6 mm de espesor y 60 cm de alto por 60 cm de ancho). Esta ventana tiene la función de un rizotrón y fue establecida de manera aleatoria en alguno de los cuatro lados de la cepa (norte, sur, este u oeste), la ventana se sujetó con estacas de madera de una pulgada de grosor y un metro de largo unidas con alambre quemado. Las estacas fueron fijadas al suelo con varillas de acero de 3/8” y 30 cm de largo. Para observar el

rizotrón se excavó una zanja rectangular de 60x60x150 cm en el mismo lado en que fue colocado el vidrio. La forma del rizotrón se muestra en la Figura 1.

Para evitar efectos de la radiación solar sobre el crecimiento radical, las zanjas de observación se cubrieron con malla sombra al 60% y sobre ésta se colocó una capa de ocoxal (acículas de pino secas) para mantener un ambiente de oscuridad (Figura 2). El uso de un rizotrón en cada árbol permitió la obtención de fotografías digitales del sistema radical, estas imágenes fueron procesadas en el software ImageJ® versión 1.50i para cuantificar la longitud y número de raíces nuevas.

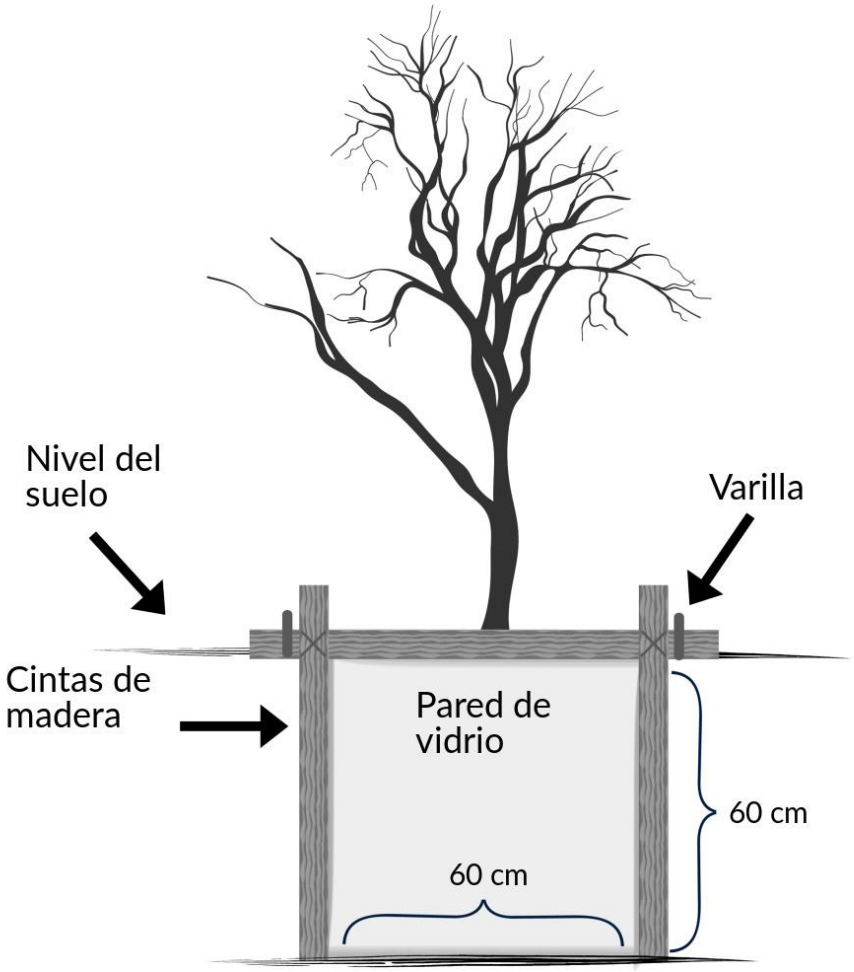

Figura 1. Modelo de rizotrón utilizado.

Figura 2. Aspecto de los árboles recién plantados con el uso de un rizotrón.

3.2.4. Diseño de plantación

Los arboles utilizados en la investigación fueron producidos a partir de semilla en un vivero de árboles urbanos ubicado en Texcoco, Estado de México. Se utilizaron 24 individuos de cuatro años de edad, con altura promedio de 2.2 metros y diámetro promedio medido a 30 cm del suelo, de 2.6 cm. Se establecieron seis repeticiones para cada tratamiento. Los árboles en el vivero permanecieron en bolsas de polietileno negro de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura. La forma de la cepa de plantación fue cuadrada con dimensiones de 30 cm de alto por 30 cm de ancho y 30 cm de profundidad. El arreglo de la parcela experimental fue lineal de norte a sur, a un espaciamiento entre árboles de tres metros. La plantación se realizó en octubre del 2016 y la duración del experimento fue de 12 meses a partir de esta fecha. Se realizaron evaluaciones periódicas, cada cuatro meses posteriores a la fecha de plantación, en cada evaluación se destaparon las zanjas de observación y se obtuvieron las fotografías digitales del sistema radical.

3.2.5. Análisis estadístico

Los datos de compactación, de suelo descompactado y sin descompactar se compararon a través de una prueba *t* de student con un α=0.1. El análisis de varianza para las variables de interés, longitud de raíz y número de raíces, se realizó con programa estadístico SAS® versión 9.4. Se decidió utilizar un nivel de confiabilidad de 10% debido a que el crecimiento del sistema radical es complejo y muy variable entre especies y ante las diferentes condiciones del suelo (Gregory & Kirkegaard, 2017). Las medias se compararon con la prueba de Tukey (*P*=0.1) y el modelo estadístico usado fue:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ij} es la variable de respuesta,

μ es la media general,

α_i es el efecto del i-ésimo nivel del factor riego,

β_j es el efecto del j-ésimo nivel del factor tratamiento al suelo,

$(\alpha\beta)_{ij}$ es la interacción entre el i-ésimo nivel del factor riego con el j-ésimo nivel del factor tratamiento al suelo y

ε_{ijk} es el error aleatorio.

3.3. Resultados y discusión

Durante los primeros cuatro meses posteriores a la plantación (octubre del 2016 a febrero del 2017), todos los árboles perdieron el follaje; sin embargo, se registró crecimiento radical al quinto mes, donde el 60% de los árboles comenzaron a mostrar brotes nuevos desde la base del tallo. A los ocho meses posteriores a la plantación se registró incremento radical en todos los árboles, aunque los brotes verdes se habían secado, posiblemente por una temporada de temperaturas

ambientales elevadas. Cabe indicar que al final del experimento sólo diez árboles presentaban brotes verdes, aunque el análisis se realizó utilizando los datos de los 24 árboles, puesto que en todos se registró crecimiento radical casi hasta el final del experimento.

3.3.1. Compactación del suelo

De acuerdo a la medición de compactación del suelo, el grado de compactación entre las dos condiciones de suelo fue bajo, todas las mediciones tuvieron lectura menor de 14 kg cm^{-2} (200 PSI, 1.38 MPa) a una profundidad máxima de 29 cm, y de acuerdo con las especificaciones del fabricante del medidor de compactación, lecturas de 0 a 14 kg cm^{-2} indican un nivel de compactación del suelo donde las raíces pueden crecer de manera ideal (DICKEY-jhon, 2017).

Aflojar el suelo de plantación no causo diferencia estadística significativa (Cuadro 2) en el grado de compactación posterior a la plantación, debido posiblemente a que el nivel de compactación original del suelo no era altamente restrictivo para el crecimiento de raíces. Por tanto, aparentemente, descompactar las paredes laterales de la cepa de plantación no aportó beneficios notables al crecimiento del sistema radical, en comparación con las condiciones originales del sitio. Sin embargo, se ha documentado que el nivel de compactación que restringe el crecimiento de raíces de especies leñosas corresponde a una la resistencia a la penetración del suelo igual o mayor a 23. 5 kg cm^2 (2.3 Mpa) (Day & Bassuk, 1994). Varios estudios han demostrado que reducir la resistencia del suelo, cuando el grado de compactación es alto, sí aporta beneficios al crecimiento de los árboles (Smiey *et al.,* 2006; Day & Bassuk, 1994; Day, Bassuk & van Es, 1995).

Cuadro 2. Compactación del suelo circundante de la plantación a diez días posteriores al inicio del experimento.

Suelo	Compactación kg cm^{-2} cm
No descompactado	0.7805 a
Descompactado	0.6125 a

Medias seguidas con la misma letra no son significativamente diferentes (Prueba *t* de student, P=0.1).

3.3.2. Longitud radical

En los árboles de todos los tratamientos se observó crecimiento radical a través del rizotrón (Figura 3); sin embargo, la longitud de raíz no mostró diferencias estadísticamente significativas (P>0.1) para los factores riego, suelo y su interacción (Cuadro 3). Este resultado indica que el crecimiento longitudinal del sistema radical de *Taxodium mucronatum* fue de igual manera al suministrar riego una vez por semana o una vez cada dos semanas, durante el primer año de crecimiento, suministrando el mismo volumen de agua.

Un sistema de raíces extenso es importante para la supervivencia de las plantas en suelos secos (Kozlowski, Kramer & Pallardy, 1991), por tanto, las raíces pueden crecer más lejos de la planta cuando el suelo no cuenta con suficiente humedad (Harris, Clark & Matheny, 2004) debido a que éstas crecen hacia donde los recursos están disponibles (Perry, 1982) y la compactación del suelo no es restrictiva (Watson *et al.*, 2014a). Por el contrario, cuando los nutrimentos y humedad en el suelo son suficientes, los árboles pueden obtener estos recursos muy cerca del tallo (Zanetti, Vennetier, Mériaux & Provansal, 2014). Esto puede explicar el por qué los árboles regados cada dos semanas tienen una longitud radical similar a sus contrapartes regados frecuentemente, además de que el suelo no presento niveles de compactación restrictiva; sin embargo, la extensión de las raíces después de la plantación también puede ser afectada por condiciones ambientales, la competencia con otras plantas, el método de producción y la salud de los árboles (Gilman, 1990).

Cuadro 3. Análisis estadístico para longitud del sistema radical (cm) de *Taxodium mucronatum* después de 12 meses de crecimiento.

Factor	P	Prueba de Tukey	
		Nivel	Media
Riego	0.2238	Frecuente	360.56 a
		Espaciado	270.04 a
Suelo	0.2242	No descompactado	360.52 a
		Descompactado	270.08 a
Riego*Suelo	0.2025		

Medias seguidas con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes (P= 0.1).

El ahuehuete se reporta como altamente demandante de humedad en su etapa juvenil (Martínez & Chacalo, 1994; Comisión Nacional Forestal & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2011) por lo que regar con el 100% de ETo de siete días, suministrado en dos frecuencias de riego no permite detectar diferencias en el crecimiento de longitud de raíces. Es más complejo encontrar diferencias en especies de árboles que requieren de grandes volúmenes de agua para satisfacer sus necesidades metabólicas y de transpiración (Craul, 1992). Por ejemplo en tres especies de arbustos (*Ilex cornuta* Lindl. & Paxt*, Pittosporum tobira* Thunb. y *Viburnum odorotissimum* Ker Gawl*.)* tratadas con tres volúmenes de riego (3, 6 y 9 litros) y dos frecuencias de suministro (2 y 4 días), la aplicación de mayor volumen de agua o con mayor frecuencia no aumentó la supervivencia o el crecimiento de las especies evaluadas (Gilman *et al.*, 2009). Por el contrario *Quercus virginiana* Mill. con riego frecuente sufrieron menor estrés que aquellos que se les aplicó riego menos frecuente en los primeros meses después de la plantación (Gilman, 2004), aunque las diferencias se perdieron después de suspender el riego.

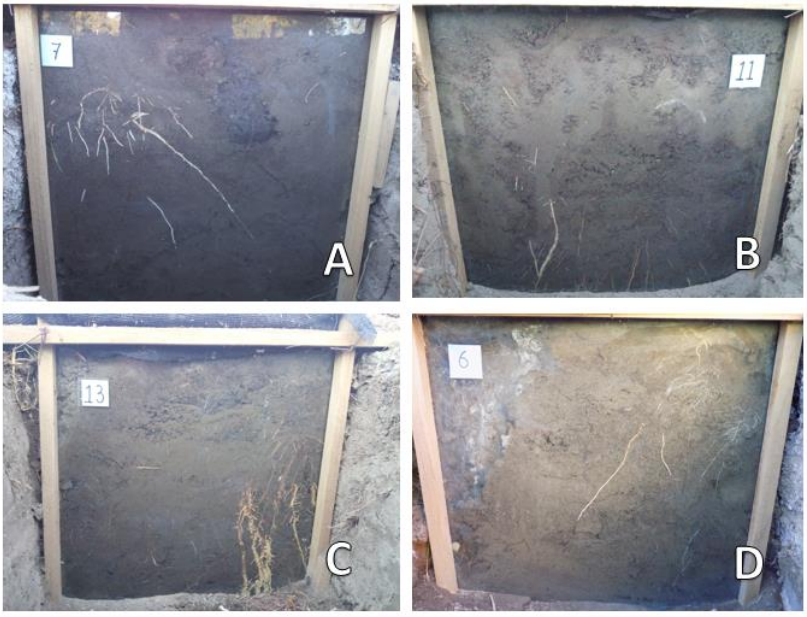

Figura 3. Muestras del crecimiento radical de *Taxodium mucronatum* en los rizotrones. A=riego espaciado suelo no descompactado, B=riego espaciado suelo descompactado, C=riego frecuente suelo no descompactado, D=riego frecuente suelo descompactado.

El uso del rizotrón se ha reportado como una buena metodología de estudio *in situ* para determinar el crecimiento del sistema radical (Abrisqueta et al., 2008; Guedea-Fernandez *et al.*, 2001; McMichael, Upchurch, & Taylor, 1992); sin embargo, los resultados de las raíces son parciales debido a que solo se registra una parte visible del sistema de raíces (Lobet & Draye, 2013). Es importante mencionar que los resultados de longitud de raíces en esta investigación, pudieron verse limitados al sólo comparar una parte del sistema radical de *Taxodium mucronatum*, debido a que el rizotrón utilizado únicamente cubrió un área estática de cada árbol y puede no proporcionar información sobre la extensión total y en todas direcciones de las raíces (Neumann, George, & Plassard, 2009). Por tal motivo, en algunos casos se recomienda complementar o combinar la información con otras técnicas *ex situ* que permitan registrar mayor volumen de raíces (Lobet & Draye, 2013) siempre y cuando las condiciones así lo permitan.

3.3.3. Número de raíces

El número de raíces observadas mostró diferencias significativas (P= 0.06435, P≤0.1) para el factor riego y la interacción riego*suelo (P= 0.0877, P≤0.1) (Cuadro 4). Los árboles regados frecuentemente (RF) y establecidos sobre suelo que no fue descompactado (SND) desarrollaron un mayor número de raíces (Figura 4), lo que en comparación con el tratamiento RE-SND indica un sistema radical más fibroso (Figura 5), pues las raíces que crecen en suelo húmedo, fértil y bien aireado se ramifican más (Harris, Clark & Matheny, 2004), incluso el número de raíces puede incrementar cuando los árboles se desarrollan en suelos de textura fina (Zanetti *et al*., 2014).

Cuadro 4. Análisis estadístico para número de raíces de *Taxodium mucronatum* después de 12 meses de crecimiento.

Factor	**P**	**Prueba de Tukey**	
		Nivel	**Media**
Riego	0.0643	Frecuente	143.83 a
		Espaciado	83.83 b
Suelo	0.2253	No descompactado	133.00 a
		Descompactado	94.67 a
Riego*Suelo	0.0877	RF-SND	190.5000 a
		RF-SD	97.1667 ab
		RE-SD	92.1667 ab
		RE-SND	75.50 b

Medias seguidas con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes (P= 0.1).

Es importante resaltar que aunque el mayor número de raíces se desarrolló en suelo no descompactado, en el presente trabajo el suelo no presento un grado de compactación restrictiva para el crecimiento de raíces, además *Taxodium mucronatum* es un especie típica de vegetación rivereña en donde puede crecer satisfactoriamente en condiciones de inundación (Lesur, 2011), lo que significa

que está adaptada a suelos mal drenados (Comisión Nacional Forestal & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2011) y con niveles bajos de aireación, por lo que aflojar el suelo pudo aumentar la proporción de macroporos, y con ello el nivel de oxígeno, disminuyendo la retención de humedad, ocasionando que el número de raíces no fuera más alto en el suelo que fue descompactado. Por otro lado niveles altos de compactación restringen el crecimiento de las raíces (Watson *et al*., 2014a); sin embargo, cuando el contenido de agua es ideal los efectos negativos de la compactación del suelo sobre el crecimiento de los árboles pueden reducirse (Bulmer & Simpson, 2005) y en ocasiones el contenido de agua en el suelo tiene mayor impacto en el crecimiento de las plantas que la compactación (Blouin, Schmidt, Bulmer & Krzic, 2008), como en el presente trabajo.

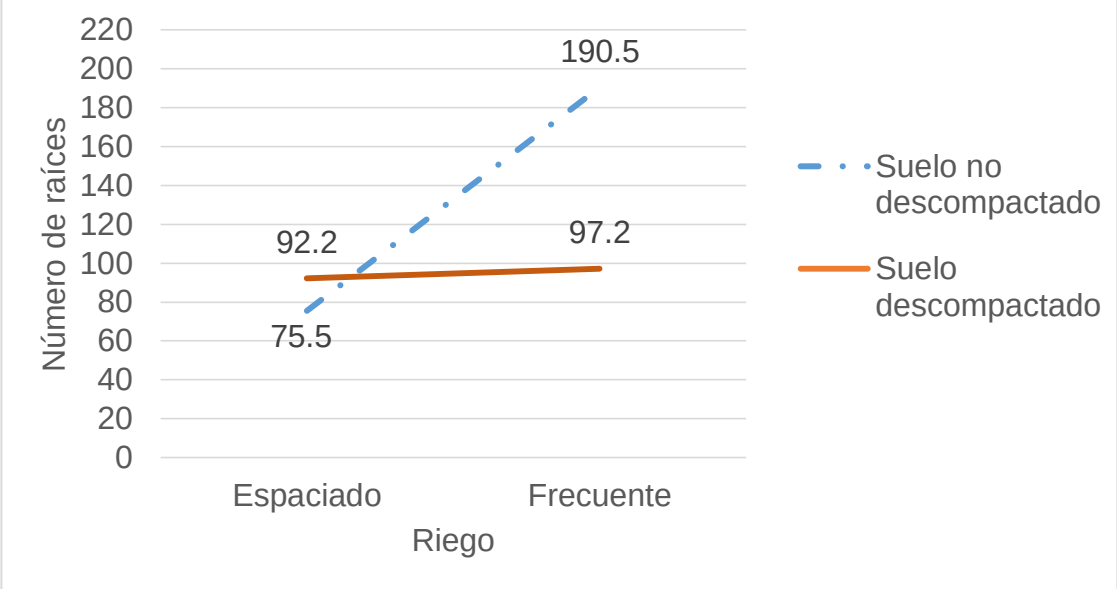

Figura 4. Interacción entre riego y suelo en respuesta al número de raíces desarrolladas de *Taxodium mucronatum.*

Se ha observado que suministrar agua de manera frecuente desarrolla mayor número de raíces, por ejemplo, riego frecuente en las primeras semanas posteriores a la plantación genera un mayor número de raíces, así como mayor distribución radial en *Acer rubrum* L. plantados en contenedores (Gilman, Grabosky, Stodola & Marshall, 2003); así también, la producción mensual de raíces finas de *Abies balsamea* L. Mill. aumentó cuando el contenido de agua del suelo se incrementó con los riegos (Olesinski, Lavigne y Krasowski, 2011). Por otro lado, el riego deficitario puede disminuir el crecimiento en altura, diámetro del tallo, área foliar y ancho de anillos de crecimiento de árboles urbanos (Martínez, Cavagnaro, Roig Juñet & Canton, 2013).

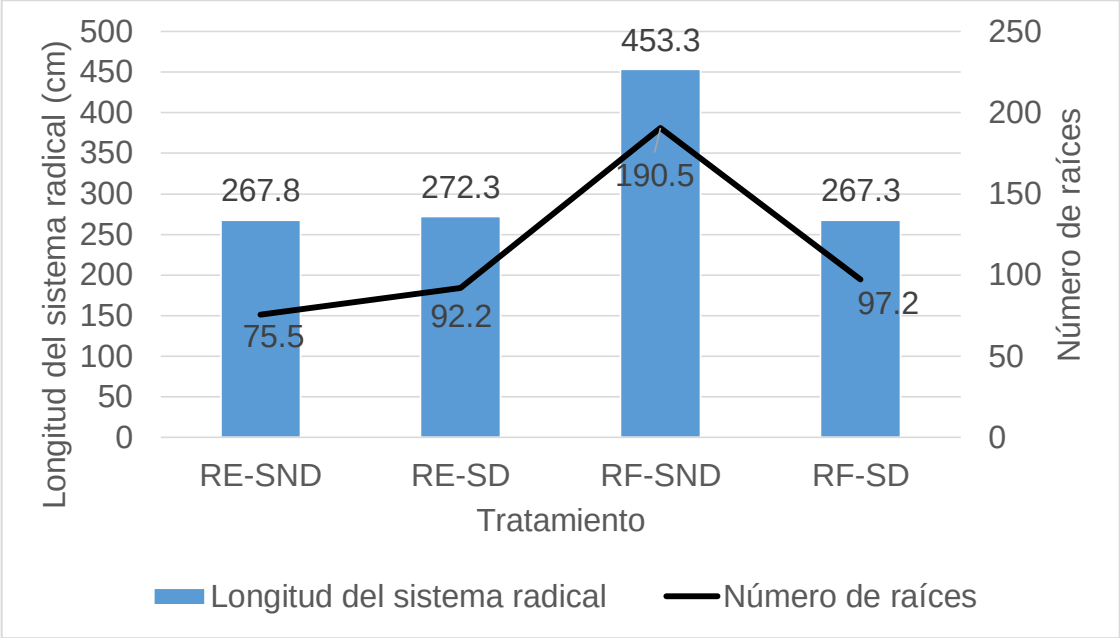

Figura 5. Longitud radical y número de raíces de *Taxodium mucronatum* por tratamiento a 12 meses posteriores a la plantación.

La anatomía y el grado de ramificación pueden definir la funcionalidad del sistema radical (Kramer, 1983). Se tiene antecedente de que *Taxodium distichum* L. produjo mayor número de raíces en una prueba de crecimiento potencial de raíz, en comparación con *Fraxinus americana* L., *Celtis occidentalis* L. y *Quercus* sp (Ellison, Schutzki, Nzokou & Cregg, 2016). Es prudente resaltar que los árboles con mayor número de raíces pueden absorber el agua de manera más eficaz

(Kozlowski, 1987) y se considera que el número de raíces es un parámetro más apropiado para medir la densidad de enraizamiento que la longitud de raíz (Smit, George & Groenworld, 2000). Es importante recordar que la composición genética de una planta controla el desarrollo, tamaño, forma y función del sistema radical pero las condiciones medioambientales y de manejo pueden alterar la expresión de éstas características (Harris *et al.,* 2004). Por ejemplo, la restricción del riego redujo el número de raíces principales de *Pinus pinceana* Gordon pero aumentó el número de raíces laterales y raíces finas en crecimiento (Córdoba-Rodríguez, Vargas-Hernández, López-Uptón & Muñoz-Orozco, 2011).

3.4. Conclusiones

El uso del rizotrón establecido en campo mostró ser una técnica útil para el monitoreo del crecimiento radical de *Taxodium mucronatum,* ya que permitió observar el efecto del riego y de la alteración del grado de compactación del suelo circundante a la cepa de plantación.

Valores de compactación bajos (<0.78 kg cm^{-2} cm) no son restrictivos para el crecimiento de raíces de ahuehuete, coincidiendo con lo reportado en estudios previos.

El suelo descompactado no mejoró el crecimiento longitudinal del sistema radical del ahuehuete ni promovió mayor número de raíces; sin embargo, el resultado se basa en la información de la parte visible del sistema radical de los árboles y a que el nivel de compactación original no representaba niveles restrictivos para el crecimiento.

El riego frecuente no generó diferencia estadística significativa en el crecimiento longitudinal de las raíces del ahuehuete, aunque el mayor número de éstas se obtuvo en los árboles que fueron tratados con riego una vez por semana y plantados en suelo no descompactado.

3.5. Literatura citada

Abrisqueta, J. M., Mounzer, O., Álvarez, S., Conejero, W., García-Orellana, Y., Tapia, L. M., Ruiz-Sánchez, M. C. (2008). Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, *95*(8), 959–967. http://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.03.003

Allen G., R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

Blouin, V. M., Schmidt, M. G., Bulmer, C. E., & Krzic, M. (2008). Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth. *Forest Ecology and Management*, *255*(7), 2444–2452. http://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.008

Böhm W. (1979). *Methods of studying root systems*. Berlín; Springer-Verlag.

Bulmer, C. E., & Simpson, D. G. (2005). Soil compaction and water content as factors affecting the growth of lodgepole pine seedlings on sandy clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, *85*(5), 667–679.

Busch, J., Mendelssohn, I. A., Lorenzen, B., Brix, H., & Miao, S. (2006). A rhizotron to study root growth under flooded conditions tested with two wetland Cyperaceae. *Flora*, *201*, 429–439. http://doi.org/10.1016/j.flora.2005.08.007

Chacalo, A., Watson, G., Bye, R., Ordaz, V., Aldama, A., & Vazquez, J. (2000). Root growth of *Quercus crassiflolia*, *Q*. *crassipes*, and *Fraxinus uhdei* in 2 different soil types. *Journal of Arboriculture, 26*(1), 30–37.

Comisión Nacional Forestal & Comisión Nacional el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2011). *Taxodium mucronatum* Ten. Recuperado de http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/1011Taxodium%20mucronatum.pdf

Córdoba-Rodríguez, D., Vargas-Hernández, J. J., López-Uptón, J. & Muñoz-Orozco, A. (2011). Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencia* 45(4): 493-506.

Craul, P. J. (1992). *Urban soil in landscape design*. John Wiley & Sons.

Day, S.D. & Bassuk, N. L. (1994). A review of the effects of soil compaction and amelioration treatments on landscape trees. *Journal of Arboriculture 20*, 9–17.

Day, S.D., Bassuk, N. L., & van Es, H. (1995). Effects of four compaction remediation methods for landscape trees on soil aeration, mechanical impedance and tree establishment. *Journal of Environmental Horticulture* 13(2), 64–71.

Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010a). Contemporary concepts of root system architecture of urban trees. *Arboriculture and Urban Forestry*, *36*(4), 149–159.

Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010b). Tree root ecology in the urban environment and implications for a sustainable rhizosphere. *Arboriculture & Urban Forestry*, *36*(5), 193–205.

DICKEY-jhon (2017). Soil Compaction Tester: Installation instructions. Recuperado de www.dickey-john.com/_media/11001-1296%20Rev%20B%20Soil%20Compaction %20Tester.pdf 02/06/2017

Ellison, D. S., Schutzki, R., Nzokou, P., & Cregg, B. (2016). Root growth potential , water relations and carbohydrate status of ash alternative species following pre-plant storage. *Urban Forestry & Urban Greening*, *18*, 59–64. http://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.05.001

Gilman, E. F. (1990). Tree root growth and development II. Response to Culture, Management and Planting. *Journal of Environmental Horticulture*, *8*(4), 220–227.

Gilman, E. F. (2004). Effects of amendments, soil additives, and irrigation on tree survival and growth. *Journal of Arboriculture, 30*(5), 301–304.

Gilman, E. F., Grabosky, J., Stodola, A., & Marshall, M. D. (2003). Irrigation and container type impact red maple (*Acer rubrum* L.) 5 years after landscape planting. *Journal of Arboriculture, 29*(4), 231–235.

Gilman, E. F., Wiese, C. L., Paz, M., Shober, A. L., Scheiber, S. M., Moore, K. A., & Brennan, M. (2009). Effects of irrigation volume and frequency on shrub establishment in florida. *Journal of Environmental Horticulture, 27*(3), 149–154.

Guedea-Fernandez, G., Arriaga-Frías, A., & De la Cruz-Guzmán, G. (2001). El efecto de maceta y el rizotrón: una herramienta para la investigación y docencia. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente, 7*(2), 115–121.

Gregory, P. J., & Kirkegaard, J. A. (2017). Growth and function of root systems. In: Murphy D. J., Thomas B., Murray B. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences.* (2a Ed., pp. 230–237). Oxford: Elsevier.

Harris, R., Bassuk, N. L., & Whitlow, T. H. (1994). A Window into below-ground growth of landscape trees: Implications for Transplant Success. *HortTechnology, 4,* 368–371.

Harris, R. W., Clark, J.R. & Matheny, N. P. (2004) *Arboriculture: Integrated management of landscape tres, shrubs, and vines*. (4ª Ed.) Prentice Hall. Unites State of America.

James, B. R., Bartlett, R. J., & Amadon, J. F. (1985). A root observation and sampling chamber (rhizotron) for pot studies. *Plant and Soil, 85*, 291–293.

Kozlowski, T. T. (1987). Soil mositure and absorption of water by tree roots. *Journal of Arboriculture*, *13*(2), 39–46.

Kozlowski, T. T., Kramer, P. J., & Pallardy, S. G. (1991). *The physiological ecology of woody plants.* Academic Press.

Kramer, P. J. (1983) *Water relations of plants*. Academic Press.

Lell, J. (2006). *Arbolado urbano. Implantación y cuidados de árboles para veredas. Buenos Aires*, Argentina: Orientación Gráfica Editora.

Lesur, L. (2011). *Árboles de México.* México: Trillas.

Lobet, G., & Draye, X. (2013). Novel scanning procedure enabling the vectorization of entire rhizotron-grown root systems. *Plant Methods*, *9*(1), 10. http://doi.org/10.1186/1746-4811-9-1

Ludovici, K. H. (2004) Tree roots and their interaction with soil. In: J. Burley, J. Evans, & J. A. (Edit.).Youngquist, *Encyclopedia of forest sciences*. Elsevier.

Martínez, G. L. & Chacalo H. A. (1994*). Los árboles de la ciudad de México*. D. F., México: Universidad Autónoma Metropolitana–Unidad Azcapotzalco.

Martinez, C. F., Cavagnaro, J. B., Roig Juñent, F. A., & Cantón, M. A. (2013). Respuesta al déficit hídrico en el crecimiento de forestales del bosque urbano de Mendoza: Análisis comparativo en árboles jóvenes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, *45*(2), 47–64.

McMichael, B. L., Upchurch, D. R., & Taylor, H. M. (1992). Transparent wall techniques for studying root growth and function in soil. *Journal of Plant Nutrition,* 15(6–7), 753–762.

Nadezhdina, N., & Cermák, J. (2003). Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. *Journal of Experimental Botany, 54*(387), 1511–1521. http://doi.org/10.1093/jxb/erg154

Neumann, G., George, T. S., & Plassard, C. (2009). Strategies and methods for studying the rhizosphere-the plant science toolbox. *Plant and Soil*, *321*, 431–456. http://doi.org/10.1007/s11104-009-9953-9

Olesinski, J., Lavigne M.B., & Krasowski M.J. (2011). Effects of soil moisture manipulations on fine root dynamics in a mature balsam fir (*Abies balsamea* L. Mill.) forest. *Tree Physiology 31*:339–348.

Perry, T. O. (1982). The ecology of tree roots and the practical significance thereof. *Journal of Arboriculture*, *8*(8), 197–211.

Raven, P.H., Evert, R.F. & Eichorn, S.E. 1986*. Biology of Plants* (4ª ed.). New York: Worth Publishers, Inc.

Richardson-Calfee, L. E., Harris, J. R., Jones, R. H., & Fanelli, J. K. (2010). Patterns of root production and mortality during transplant establishment of landscape-sized sugar maple. *Journal of the American Society for Horticultural Science, 135*(3), 203–211.

Roman, L. A., Walker, L. A., Martineau, C. M., Muffly, D. J., Macqueen, S. A., & Harris, W. (2015). Stewardship matters: Case studies in establishment success of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening, 14*(4), 1174–1182.

Ryser, P. (2006). The mysterious root length. *Plant and Soil, 286*(1–2), 1–6. http://doi.org/10.1007/s11104-006-9096-1

Smiley, E. T., Calfee, L., Fraedrich, B. R., & Smiley, E. J. (2006). Comparison of structural and noncompacted soils for trees surrounded by pavement. *Arboriculture and Urban Forestry, 32*(4), 164–169.

Smit, A. L., George, E., Groenworld J. (2000). Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil. *In*: A. L. Smit, A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, & S. C. van de Geijn, Eds). *Root methods: a handbook*. Berlin: Springer-Verlag.

Stoke, A., Fourcaud, T., Hruska, J., Cermak, J., Nadyezdhina, N., Nadyezhdin, V., & Praus, L. (2002). An evaluation of direfent methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar. *Journal of Arboriculture, 28*(1), 2–10.

Silva, D. D., & Beeson, R. C. (2011). A large-volume rhizotron for evaluating root growth under natural-like soil moisture conditions. *HortScience, 46*(12), 1677–1682.

Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014a). The management of tree root systems in urban and suburban settings: a review of soil influence on root growth. *Arboriculture & Urban Forestry, 40*(4), 193–217.

Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014b). The management of tree root systems in urban and suburban settings II : A review of strategies to mitigate human impacts. *Arboriculture & Urban Forestry, 40*(5), 249–271.

Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., & Provansal, M. (2014). Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant and Soil*, *387*(1–2), 21–35.