

CRECIMIENTO Y ESTRÉS POST-TRASPLANTE DE ÁRBOLES DE PINO EN SUELO SALINO URBANO

L. Mohedano-Caballero^{1¶}; V. M. Cetina-Alcalá¹; A. Chacalo-Hilu²;
A. Trinidad-Santos³; F. González-Cossio⁴

¹Programa Forestal, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230, MÉXICO.

Correo-e: mohedano@colpos.mx ([¶]Autor responsable).

²Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México, D. F. C. P. 09220, MÉXICO.

³Área de Fertilidad de Suelos, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230, MÉXICO.

⁴Programa de Estadística, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230, MÉXICO.

RESUMEN

El ambiente urbano y algunas prácticas de arboricultura provocan disminución del crecimiento en árboles (estrés fisiológico), que no siempre se percibe visualmente. El estrés ha sido estudiado en varias especies arbóreas con diversos métodos que requieren equipo costoso de alta precisión. En México existe poca investigación al respecto, no obstante la gran cantidad de especies con potencial de uso en arboricultura. Esta investigación busca identificar estrés en árboles de *Pinus greggii* Engelm., trasplantados en suelo urbano salino. Se emplearon 25 árboles de siete años de edad; algunos se banquearon 90 y 180 días antes de ser trasplantados, con y sin azufre en el suelo, ya que este elemento ha probado su utilidad para reducir en pH de suelos alcalinos. Los árboles testigo no fueron banqueados ni trasplantados. Las técnicas para identificar estrés en los árboles fueron: la eficiencia fotosintética de las hojas, medida como fluorescencia de la clorofila; la intensidad del color verde del follaje, y la corriente geofitoeléctrica del sistema suelo-planta; además del crecimiento en altura y diámetro del tronco, de los árboles. Según los resultados obtenidos, la eficiencia fotosintética y la corriente geofitoeléctrica, identificaron disminución del crecimiento (estrés) en los pinos, como resultado del banqueo y trasplante. Respecto al tiempo de banqueo, los tratamientos de 180 días recuperaron los niveles de los parámetros considerados antes que los de 90 días. La salinidad del suelo no afectó los tratamientos, pues los árboles fueron regados regularmente, evitándoles estrés por deficiencia de humedad y lixiviando el exceso de sales del suelo.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: *Pinus greggii* Engelm., banqueo, salinidad, trasplante.

GROWTH AND POST-TRANSPLANTING STRESS OF PINE TREES IN URBAN SALINE SOIL

ABSTRACT

The urban environment and some arboriculture practices cause a reduction of tree growth (physiological stress), that cannot always be perceived visually. Stress has been studied in several arboreal species using diverse methods that require costly high-precision equipment. In Mexico there is little research on this, despite the great amount of species with arboriculture use potential. This investigation has the purpose of identifying stress in *Pinus greggii* Engelm., transplanted into urban saline soil. We used 25 seven-year-old trees; some were balled and burlaped (B & B) 90 and 180 days before being transplanted, with and without sulfur in the soil. Control trees were not (B & B) nor transplanted. Techniques used to identify stress in the trees were: leaf photosynthetic efficiency, measured as chlorophyll fluorescence; intensity of green in the foliage; and plant-geoelectric current of the soil-plant system; also tree height and trunk diameter growth. According to results obtained, photosynthetic efficiency and plant-geoelectric current identified a growth decrease (stress) in pines, as a result of B & B and transplanting. According to B & B period, 180-day treatment recovered their levels for the variables considered before those plants bagged for 90 days. Soil salinity did not affect treatments, because trees were watered regularly, avoiding stress due to moisture deficiency and leaching excess salts from the soil.

ADDITIONAL KEY WORDS: *Pinus greggii* Engelm., ball, burlap, stress, salinity, transplant

INTRODUCCIÓN

Los árboles urbanos en ocasiones son plantados en sitios con limitaciones para su desarrollo, induciéndolos a estrés fisiológico por déficit de agua principalmente, reduciendo su crecimiento al afectar la fotosíntesis (Teskey y Hinckley, 1986); lo que los hace vulnerables a factores ambientales adversos. Algunas prácticas de arboricultura, como el trasplante, pueden provocar este tipo de estrés en los árboles, ya que al banquearlos se les elimina hasta el 95 % del sistema radical (Watson *et al.*, 1986; Lilly, 1999), lo que los induce a estrés por la pérdida de raíces y desbalance hídrico entre la absorción de agua y la transpiración. En general los daños mecánicos y la discontinuidad funcional entre el suelo y las raíces afectan los procesos vitales de la planta (Girard *et al.*, 1997). El estrés fisiológico ha sido detectado y estimado en varias especies de árboles, a través de diferentes métodos, como la fluorescencia de la clorofila, el contenido de clorofila en follaje y su coloración, la concentración de carbohidratos en diferentes tejidos y la corriente geofitoeléctrica, entre otros.

Utilizando un fluorómetro se midió en plantas de *Alnus cordata* Desf., el estrés provocado por la interacción de salinidad en el follaje, aplicada como rocío con diferentes concentraciones de NaCl, y condiciones de drenaje (adecuado y deficiente). Se analizó la presencia de necrosis foliar, el abatimiento del electrolito celular, el crecimiento del tallo y la concentración de macronutrientes. La fluorescencia de la clorofila reflejó la disminución de la eficiencia fotosintética, aunque la necrosis foliar se manifestó visiblemente antes que ésta. La concentración de nutrientes en general no indicó la presencia de estrés, excepto en condiciones de drenaje deficiente (Percival y Dixon, 1997). Por su parte, Lamontagne *et al.* (2000) estudiaron el efecto de la cantidad de luz en plántulas de *Picea mariana* Mill., en combinación con diferentes regímenes de temperatura diaria (diurna y nocturna); a través de la fluorescencia de la clorofila se identificaron daños en el sistema fotosintético de las plantas que habían crecido con poca luz. Peltzer y Polle (2001) estudiaron los mismos factores en hojas de *Fagus sylvatica* L., para probar que el sistema antioxidante de la fotosíntesis (producción de la enzima ascorbataasa), se ajusta flexiblemente ante fluctuaciones ambientales de estos factores en el corto plazo. El método para identificar dicho ajuste fue la eficiencia fotosintética, en términos de fluorescencia de la clorofila, y los resultados mostraron además, que la producción de la enzima de defensa no respondía directamente a las fluctuaciones de luz, debido probablemente a que las mediciones se hicieron en condiciones naturales con una especie adaptada a ese tipo de fluctuaciones.

Brand (1997) midió la coloración y contenido de clorofila en el follaje, además del crecimiento en altura y el

número de ramas nuevas de árboles de *Kalmia latifolia* L., en respuesta a la poda de formación comercial. Después del segundo año el crecimiento en altura disminuyó con la poda. El color (medido a través de un colorímetro) y la concentración de clorofila en las hojas (medida con un espectrómetro) se incrementaron significativamente en respuesta a este tipo de poda.

El contenido de carbohidratos de reserva en las plantas, obtenido por análisis químico en laboratorio, es otro parámetro estrechamente relacionado con el crecimiento. En un estudio con estacas de *Salix viminalis* L., a las que se adicionó nitrógeno (en dosis óptima y baja) en la etapa de reposo, Firsck y Sennerby-Forsse (1998) midieron la concentración de almidón en diferentes partes de la estaca, a lo largo de su desarrollo; a algunas estacas se les eliminaron los brotes iniciales. Los resultados mostraron que las raíces de las estacas a las que se les eliminaron los brotes primarios, habían agotado sus reservas de almidón, no así en las que no se les eliminaron dichos brotes, confirmando que la reserva de carbohidratos en la raíz es importante en la fase inicial del rebrote en esta especie. Otra investigación donde se cuantificó la concentración de carbohidratos, en acículas y raíz, además del potencial de presión de agua en las acículas (con una bomba de presión) y el potencial de crecimiento radical (número de elongaciones radicales blancas), fue realizada por Guehl *et al.* (1993), éstos relacionaron los parámetros anteriores con el régimen de humedad de plántulas de *Pinus nigra* ssp. *laricio* var. *corsicana* trasplantadas. Algunas plantas se regaron normalmente y otras se sometieron a sequía moderada antes del trasplante. Las plantas en sequía no incrementaron su concentración de carbohidratos, ni su tolerancia al estrés por trasplante, como se había supuesto inicialmente, con lo que se concluye que el estrés en las plantas se presenta prácticamente ante cualquier alteración ambiental. Tinus *et al.* (2000) utilizaron plántulas de *Pinus halepensis* Mill., *P. radiata* D. Don y *Pseudotsuga menziesii* var. *galauca* (Beissn.) Franco, aclimatadas y desaclimatadas a bajas temperaturas (2 °C) durante 24 semanas en una cámara de crecimiento, y midieron en tejidos de raíz y follaje la concentración de carbohidratos solubles y almidón a través de análisis químico. Adicionalmente se midió la resistencia al frío de las acículas, a través del abatimiento del electrolito inducido por congelamiento. La concentración de almidón no se relacionó con la resistencia de las acículas al frío, la variación de éste se atribuye a factores de producción y consumo de la planta.

Existe una estrecha relación entre el vigor de las plantas con la intensidad de electricidad natural que se genera en el complejo suelo-planta (Radja, 1992, Hüttl, *et al.*, 1989; citados por Salgado *et al.*, 1995). El diagnóstico fitosanitario de plantas a través de la corriente geofitoeléctrica (CGFE) se fundamenta en que la corriente eléctrica, medida con un voltímetro, es más alta en árboles

sanos que en los enfermos. Es posible identificar un comportamiento de la CGFE en árboles con diferente grado de daño, estableciendo que la intensidad de la CGFE disminuye hasta cero cuando el árbol muere (Salgado *et al.*, 1995). Wargo y Skutt (1975) utilizaron la forma inversa de la conductividad eléctrica, la resistencia eléctrica (RE), para detectar estrés por ataque de insectos defoliadores (*Lymantria dispar* L.) en cuatro especies de *Quercus*, concluyendo que la RE fue menor en árboles no defoliados, que en aquellos que estaban bajo ataque de los insectos. También observaron diferencias entre especies del género y entre categorías sociológicas del arbolado, los árboles dominantes opusieron mayor resistencia al ataque que los intermedios y suprimidos. De igual manera, se han observado cambios significativos en la RE de *Pinus densiflora* atacados por nemátodos de la especie *Bursaphenches xylophylus* (Fukuda y Suzuki, 1988; citados por Salgado *et al.*, 1995). La conductividad eléctrica también se utilizó para identificar falta de humedad en el suelo de un bosque tropical seco en Costa Rica, con más de 30 especies de árboles. Con la medición del contenido de saturación de agua y de deshidratación en el tallo (mediante una bomba de presión), se pudo establecer correlación entre estos parámetros con la CGFE (Borchert, 1994). Dixon *et al.* (1978) hicieron mediciones simultáneas de la conductividad eléctrica (con un microvoltímetro) y del potencial de humedad (con una bomba de presión) en hojas de árboles de aguacate (*Persea americana* Mill.) y *Picea* (*Picea glauca* Voss.), encontrando correlación positiva entre ambos parámetros. La técnica demostró ser simple, no destructiva y adecuada para dar seguimiento al potencial de humedad en árboles.

La regeneración del sistema de raíces de un árbol banqueado inicia casi inmediatamente después de la poda (preparación del cepellón); los árboles pequeños (diámetro menor a cuatro pulgadas) generalmente se recuperan más pronto del estrés post-trasplante, que los árboles grandes (Watson, 1985). Para reducir este estrés la arboricultura moderna recomienda no podar ramas vivas ni aplicar fertilizantes o mejoradores del suelo, en el trasplante, ni durante los tres a seis meses posteriores, tiempo en que se establecen las nuevas raíces, ya que cuanto más tiempo transcurra entre el banqueo del cepellón y el trasplante, el árbol formará un sistema de raíces más fibroso; sin embargo, tampoco es recomendable que el árbol pase mucho tiempo en esta condición porque las raíces nuevas pueden anclarse en el suelo, y al momento del trasplante se le provocaría estrés nuevamente (Anónimo, 2000). No existe suficiente información respecto al tiempo óptimo de banqueo para las especies arbóreas.

El azufre elemental y en forma de fertilizante ha sido utilizado para reducir el pH de suelos alcalinos, y favorecer la disponibilidad de otros elementos esenciales para el desarrollo vegetal. En la década de los años sesenta del

siglo pasado Li y Caldwell observaron que el ácido sulfúrico, producto de la oxidación del azufre, incrementó la concentración de iones H^+ , disminuyendo el pH del suelo; de igual manera Kashirad en 1972, estudió el efecto del azufre aplicado a un suelo aluvial de pH 8.3, encontrando que los tratamientos con este elemento disminuyeron significativamente su alcalinidad, incrementando la disponibilidad del fósforo (Rivera, 1988).

En ocasiones no es fácil medir estrés en árboles por lo costoso de los aparatos que algunos métodos requieren, además del personal capacitado e instalaciones adecuadas, por ello se necesita desarrollar técnicas que estimen de manera fácil y confiable el estado fisiológico de las plantas. Por otro lado, el género *Pinus* posee más de 50 especies en México, muchas con potencial de uso en la arboricultura, por su forma y su distribución fitogeográfica; sin embargo, han sido poco utilizados en plantaciones urbanas; su utilización requiere del conocimiento de técnicas de arboricultura así como los efectos y respuestas de los árboles a éstas y al ambiente. Con este propósito, el presente trabajo plantea como objetivos, evaluar el estrés fisiológico post-trasplante de árboles jóvenes de *Pinus greggii* Engelm., a través de la eficiencia fotosintética de las acículas, el análisis por computadora, de la intensidad del color verde del follaje, y la medición de la corriente eléctrica del sistema suelo-planta; además de evaluar el crecimiento en altura y diámetro de los árboles trasplantados, banqueados con 90 y 180 días de anterioridad al trasplante, e identificar la influencia del azufre como mejorador del pH del suelo, en el establecimiento de estos árboles en suelo salino.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en Montecillo, México, en un estacionamiento vehicular. El clima del lugar es templado subhúmedo, con lluvias en verano. El suelo superficial es física y químicamente heterogéneo, con textura migajón arenosa y pH promedio de 8 a los 70 cm de profundidad éste presenta características homogéneas, con textura migajón limosa y pH promedio de 8.8; en general es de baja fertilidad con escasa materia orgánica y alta concentración de sales de sodio (Ortiz-Solorio, 1979).

El experimento se estableció como un diseño completamente al azar con los factores: tiempo de banqueo y preparación del suelo de trasplante. El primero se dividió en dos niveles: 90 y 180 días de banqueo previos al trasplante (dbpt); el segundo se dividió en dos tratamientos de cepa: cepas donde se utilizó sólo el suelo natural del sitio (S0), y cepas donde al suelo natural se le adicionó azufre agrícola (S1), para bajar su valor de pH. La combinación de estos factores generó cuatro tratamientos, más uno sin banqueo ni trasplante:

CUADRO 1. Descripción de los tratamientos del experimento y su representación simbólica.

Descripción de los tratamientos	Símbolo
Árboles con 90 dbpt ² en suelo natural del sitio	90S0
Árboles con 90 dbpt en suelo natural del sitio + azufre	90S1
Árboles con 180 dbpt en suelo natural del sitio	180S0
Árboles con 180 dbpt en suelo natural del sitio + azufre	180S1
Árboles sin banqueo ni trasplante	Testigo

²dbpt: días previos al banqueo

Las cepas de plantación fueron de 1.3 m de largo, 1.1 m de ancho y 70 cm de profundidad, con seis metros de separación entre ellas; el suelo extraído de todas las cepas se mezcló para homogeneizarlo, con el fin de que al momento de la plantación todos los árboles estuvieran en contacto con el mismo tipo de sustrato. A este suelo se le determinaron algunas características físicas y químicas (textura, densidad aparente, pH, CE y CIC). La mitad de este suelo se apartó para aplicarle el azufre como parte de los tratamientos del experimento. La cantidad de azufre por cepa se determinó con base en las características del suelo, antes citadas; el cálculo determinó la cantidad de 10 kg de producto por cepa, la cual fue fraccionada en dos porciones de 5 kg. Una porción fue aplicada a las cepas de los tratamientos con azufre, esparciendo el producto sobre las paredes y el piso, y dejándolo reaccionar por cuatro semanas; la segunda mitad del azufre se mezcló a la mitad del suelo homogeneizado que se había apartado, para constituir el suelo de relleno de las cepas con tratamiento de azufre.

Se utilizaron 25 árboles de *Pinus greggii* Engelm., de siete años de edad (5.5 m de altura y 5.56 cm de diámetro, promedio), provenientes de viveros especializados en producción urbana. Los árboles se banquearon en dos fechas diferentes, abril y julio del 2001. El banqueo consistió en excavar los árboles y confinar sus raíces en un envoltorio de polietileno (cepellón). El cepellón fue de forma irregularmente esférica (aproximadamente 60 cm de diámetro); los árboles banqueados permanecieron enterrados en el vivero hasta su trasplante. La plantación se realizó en octubre del 2001, retirándoles la cubierta del cepellón y cubriéndolos con el suelo preparado, según el diseño del experimento. Los árboles se regaron periódicamente a fin de evitarles estrés hídrico. El experimento tuvo con cinco tratamientos y cinco repeticiones; la unidad experimental estuvo constituida por cada árbol individual. Los resultados se analizaron a través del programa estadístico SAS, mediante análisis de varianza y comparación de medias de Tukey con una $P \leq 0.05$.

Las variables de medición en los árboles fueron la altura (m), medida con una pistola Hagga; el diámetro del tronco a 1.3 m del suelo (cm), medido con un vernier; y la

presencia de estrés fisiológico provocado por las maniobras de banqueo y trasplante. El estrés se identificó mediante la eficiencia fotosintética de las acículas, la intensidad del color verde del follaje y la conductividad eléctrica del sistema suelo-planta:

Eficiencia fotosintética

El método consistió en medir la máxima fluorescencia de la clorofila de las acículas y dividir su valor entre el tiempo (s) en que ésta se alcanzó, expresándose como eficiencia fotosintética ($\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$). Se utilizó un fluorómetro (Plant efficiency Analyser PEA2, Hansatech Instruments LTD) en el follaje maduro del crecimiento del año anterior.

Intensidad del color verde del follaje

Ésta se midió a través del programa de cómputo Adobe Photoshop 6.0®, con imágenes de ramas de los árboles, obtenidas con una cámara digital (Intel Web Cam -004). Dichas imágenes se tomaron en condiciones similares (hora del día y luminosidad) en todos los muestreos, y se analizaron con la herramienta Histograma-color verde del programa de cómputo. Las unidades de información se expresaron en pixeles del color verde.

Conductividad eléctrica del sistema suelo-planta

Se midió utilizando un voltímetro (Mitzu, MP-4000). Se clavó una varilla de acero en el suelo, a 30 cm del tronco del árbol, y a 40 cm de profundidad. Se incrustó un clavo de hierro de 1.5 pulgadas en el tronco del árbol, a 1.30 m de altura, haciendo presión con los dedos, procurando una inserción de aproximadamente medio centímetro. Se conectaron los diodos del voltímetro al sistema, el polo positivo al tallo del árbol y el polo negativo a la varilla. La lectura se expresó en voltios (v).

El experimento duró un año y medio, la colecta de información se llevó a cabo en las fechas indicadas en el Cuadro 2.

CUADRO 2. Fechas de colecta de los datos del experimento.

Número y fecha de muestreo	Fase del experimento
1 abril 2001	Inicio del experimento y banqueo del tratamiento con 180 días de banqueo previo al trasplante.
2 julio 2001	Banqueo del tratamiento con 90 días de banqueo previo al trasplante.
3 octubre 2001	Octubre 2001, trasplante.
4 enero 2002	90 días posteriores al trasplante.
5 abril 2002	180 días posteriores al trasplante.
6 julio 2002	270 días posteriores al trasplante.
7 septiembre 2002	365 días posteriores al trasplante y fin del experimento.

Con la finalidad de confirmar si el sistema de raíces de los árboles testigo, que continuaron su crecimiento en el vivero, era igual de fibroso que el de los árboles banqueados, se obtuvieron muestras de suelo de cada árbol con una barrena cilíndrica (10 cm de diámetro x 50 cm de longitud), a 40 cm de distancia del tronco. Las raíces de cada árbol se separaron manualmente del suelo y se lavaron, para posteriormente medir su superficie con un integrador de área foliar (LI-Cor, Inc., LI-3100 Area Meter). Estos resultados son una estimación del valor real de la superficie de absorción del sistema radical de los árboles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura y diámetro

En ambas variables los árboles del tratamiento testigo mantuvieron un incremento constante durante el experimento, sus valores siempre fueron superiores a los de los demás tratamientos. Los árboles trasplantados reportaron crecimiento después de 180 días de la plantación (Cuadro 1). Con respecto a las fechas de banqueo, prácticamente no se distinguieron diferencias entre tratamientos. La explicación de este comportamiento se sustenta con el trabajo de Guehl *et al.* (1993), quienes trabajaron con plántulas de *Pinus nigra* ssp. *laricio* var. *corsicana*, sometidas a sequía y trasplante; sus resultados señalaron que existen mecanismos ligados al déficit de humedad y a procesos metabólicos de la síntesis de carbohidratos, relacionados con el estrés post-trasplante, que disminuyen la concentración de almidón de prácticamente toda la planta e inhiben el crecimiento, interrumpiendo la brotación de la yema apical. Los autores sugieren que esto se debe a la alta demanda de carbohidratos que se registra en las raíces. Los árboles trasplantados están sujetos a estrés hídrico por la pérdida de raíces (Watson *et al.*, 1986) y se ha observado que este déficit provoca disminución del crecimiento en altura y diámetro de árboles de *Pinus taeda* L. (Teskey y Hinckley, 1986).

Eficiencia fotosintética

A 90 días de ser banqueados, los tratamientos con 180 dbpt mostraron un marcado descenso en su eficiencia fotosintética con respecto a los árboles testigo y los que aún no se les practicaba esta maniobra. En el mes de julio se realizó la segunda lectura de las variables, los árboles con tratamiento de 90 dbpt (aún no banqueados), mostraban un comportamiento similar al de los árboles testigo, después de esta lectura se banquearon.

En octubre todos los árboles banqueados se llevaron al sitio de plantación y en ese momento arrojaron los valores mínimos de eficiencia fotosintética. Los tratamientos con 180 dbpt mostraron nuevamente un descenso en sus valores, lo que probablemente indicó que el estrés causado

a los árboles por el trasplante fue más severo que el provocado por el banqueo, ya que después de esta práctica estos árboles permanecieron en condiciones normales de vivero (riego y fertilización); en cambio, el trasplante implicó maniobras de extracción, carga-descarga, y transporte de los árboles. Por su parte los árboles de 90 dbpt reportaron valores de la variable considerablemente bajos en comparación al testigo, aunque estadísticamente similares a los de 180 dbpt hasta tres meses después de la plantación, lo cual pudiera indicar un mismo nivel de estrés; desde ese momento hasta el final del experimento, los tratamientos con 90 dbpt se ubicaron significativamente por debajo de los demás, esto quizá debido a que se trató de árboles que tuvieron poco tiempo para reestablecer su sistema radical, dificultando así el crecimiento de éste dentro del cepellón, hacia el suelo de relleno y el suelo natural del sitio (Ware, 1982). Los árboles trasplantados pueden morir en el periodo de establecimiento si no reciben el manejo adecuado (preparación de la cepa, riego y tutorado, entre otros), mientras se desarrolla un sistema radical fibroso.

A lo largo del experimento el tratamiento testigo siempre se mantuvo con valores de eficiencia fotosintética superiores respecto a los tratamientos trasplantados. A noventa días del trasplante los tratamientos banqueados mostraron signos de recuperación en la variable, como resultado del rebrote de raíces (Watson y Sydnor, 1987); sin embargo, los tratamientos con 180 dbpt presentaron valores ligeramente superiores a los de noventa días, aunque sin diferencia estadística. Después de 180 días del trasplante, los tratamientos banqueados tuvieron valores muy similares entre sí, mostrando una tendencia ascendente, aunque sin diferencias significativas entre ellos. Al final del experimento, un año después de la plantación, los tratamientos banqueados igualaron al testigo, lo que pudiera interpretarse como la recuperación de las plantas de la condición de estrés (Figura 1).

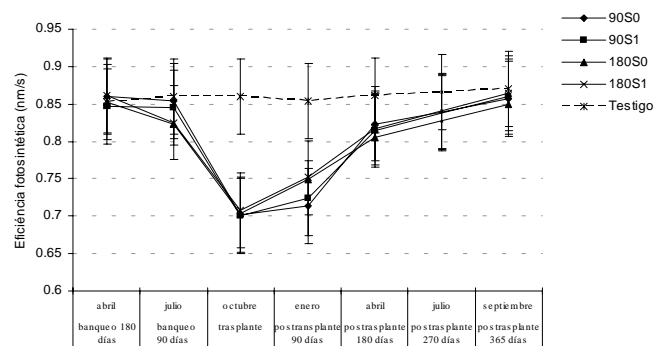


FIGURA 1. Eficiencia fotosintética medida a través de un fluorómetro en árboles de *Pinus greggii* Engelm., bajo diferentes condiciones de trasplante. 9050:90 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 9051:180 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 18051:180 días de banqueo previos al trasplante con azufre.

Watson *et al.* (1986) detectaron síntomas de estrés post-trasplante en especies latifoliadas de árboles, a través del crecimiento de sus brotes aéreos; los autores identificaron que los árboles recuperaron su tasa de crecimiento que tenían antes del trasplante, hasta pasados cinco años de esta maniobra. En la presente investigación la recuperación del vigor en los árboles de pino, en términos de eficiencia fotosintética, se alcanzó en un año. Lo anterior pudiera relacionarse con el manejo post-trasplante que recibieron estos árboles, principalmente riego constante y eliminación de la vegetación competidora; además de que por tratarse de una especie perennifolia, la eficiencia fotosintética disminuyó pero nunca por completo. Los árboles testigo continuaron su crecimiento normal en el vivero, pero probablemente con un sistema de raíces disperso y menos fibroso. Watson y Sydnor (1987) compararon el sistema de raíces de árboles de *Picea pungens* Engelm., banqueados y no banqueados, encontrando que la poda de raíz (banqueo) incrementó tanto la superficie total de las raíces, como el porcentaje de éstas dentro del cepellón, lo cual se reflejó en una mayor capacidad para absorber agua y sales minerales.

Color verde del follaje

El método de las imágenes digitales no parece ser lo suficientemente sensible para detectar de manera inmediata el estrés causado por el banqueo y el trasplante, ya que los tratamientos banqueados, así como el testigo, presentaron una coloración similar en su follaje, y las diferencias que se lograron detectar no fueron significativas (Figura 2). Fue hasta después de 180 días de la plantación que hubo diferencia estadística en el tratamiento 90S0; y al término del experimento los dos tratamientos con banqueo de 90 días se situaron claramente por debajo de los demás. Esta aparente sensibilidad tardía del método parece tener que ver más con la maduración anticipada del follaje de los árboles, que con el estrés fisiológico

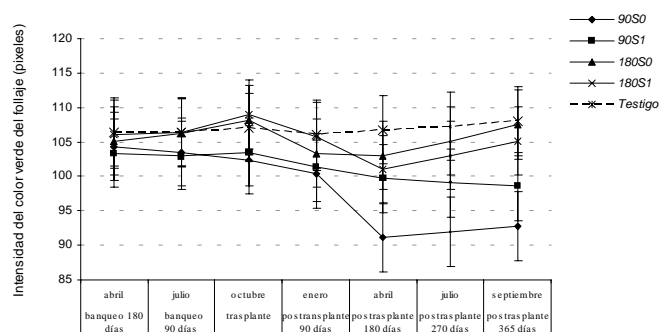


FIGURA 2. Intensidad del color verde del follaje (píxeles) medida a través de imágenes de cámara digital y el programa Adobe Photoshop®, en árboles de *Pinus greggii* Engelm., bajo diferentes condiciones de trasplante. 90S0:90 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 90S1:180 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 180S1: 180 días de banqueo previos al trasplante con azufre.

provocado por el banqueo y trasplante, ya que los árboles fueron mantenidos con riego constante durante todo el experimento, con lo que se minimizó considerablemente esta condición (Watson y Sydnor, 1987).

Como parte del método se utilizaron imágenes digitales de ramas completas, con acículas en diferente grado de maduración, es por ello que la coloración de dichas ramas prácticamente no varió a lo largo del año, ya que a medida que el follaje maduro envejecía y se volvía opaco, brotaba el nuevo follaje de color verde intenso y tono brillante (al inicio de la época de crecimiento), situación que se observó en casi todos los tratamientos. Al final del experimento los tratamientos de árboles con 90 dbpt, se situaron estadísticamente por debajo de los demás, lo cual pudiera estar relacionado con algún efecto tardío del estrés, por tratarse de árboles trasplantados con menor tiempo de banqueo, cuyo sistema radical aún no se hubiese desarrollado lo suficiente, como para expresar tonos de un árbol vigoroso.

Conductividad eléctrica del floema

Los resultados de esta variable indicaron que se trata de un método sensible a eventos estresantes como el banqueo y trasplante, en esta especie de pino, y de acuerdo con la literatura, al ataque de plagas (Wargo y Skutt, 1975; Salgado *et al.*, 1995) y el déficit de humedad (Borchert, 1994), en otras especies arbóreas. La utilidad del método se debe a que cuantifica el flujo de cargas eléctricas de iones y solutos disueltos en el floema (Wargo y Skutt, 1975), ya que la mayor cantidad de sustancias de reserva se concentra en las células de parénquima, esparcidas en el floema y la corteza interna (Waring y Schlesinger, 1985).

Los tratamientos 180S0 y 180S1 disminuyeron su conductividad eléctrica con respecto al testigo a los 90 días después del banqueo, y aún más al momento del trasplante, lo que podría indicar que el estrés causado por el trasplante fue más severo que el provocado por el banqueo en los árboles de esta especie, lo anterior se sustenta con los resultados obtenidos a través del método de la eficiencia fotosintética, de la presente investigación. Por su parte los tratamientos 90S0 y 90S1 también experimentaron un fuerte descenso de la variable al ser trasplantados (Figura 3).

Por sus características propias el método se ve afectado por las bajas temperaturas (Salgado *et al.*, 1995), como lo muestran los bajos valores de voltaje en el tratamiento testigo a noventa días de la plantación, tiempo correspondiente a enero (2002) que en el hemisferio norte representa el mes más frío. A partir de este mes en que se observó el punto mínimo de la variable, todos los tratamientos iniciaron su recuperación; el testigo de manera abrupta, para situarse en un intervalo de valores que tenía antes de la época fría, y los tratamientos banqueados lo

hicieron de manera discreta, sin diferencia estadística entre ellos. Al final del experimento los tratamientos con 180 dbpt se ubicaron en la misma categoría estadística que el testigo, y los de noventa días permanecieron con valores estadísticamente inferiores (Figura 3).

Respecto a la fibrosidad de la raíz de los árboles, cuantificada adicionalmente a los métodos para identificar estrés en los árboles trasplantados, se observó mayor abundancia de raíz en los árboles con mayor tiempo de banqueo. Los árboles testigo mostraron al final del experimento menor cantidad de raíz que aquellos tratamientos con 180 dbpt, aunque sin llegar a ser significativamente diferentes; esto se atribuye a que el muestreo de raíces se realizó a 40 cm del tronco, dentro del cepellón de los árboles banqueado, abundante en raíces nuevas, y en el caso de los árboles testigo (árboles sin banqueo), su sistema de raíces seguramente era más disperso y no se encontraba confinado tan cerca del tallo (Watson y Sydnor, 1987). Respecto a los árboles con 90 dbpt, éstos se situaron estadísticamente por debajo del tratamiento testigo y los de 180 días (Figura 4). Los resultados obtenidos concuerdan con lo observado por Watson y Sydnor (1987), quienes cuantificaron la fibrosidad del sistema radical de árboles de *Picea pungens* Engelm., después de cinco años de haber sido podados, y lo compararon con árboles sin banquear, sus resultados indicaron que los primeros prácticamente duplicaron la superficie de raíces, y que la mayor abundancia horizontal de éstas se encontraba entre el tronco y 80 cm, así como entre la superficie y los primeros 45 cm de profundidad.

Adición de azufre

La adición de azufre al suelo no parece haber influido en el comportamiento de los árboles, ya que prácticamente en ningún momento hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos donde al suelo natural se le agregó azufre, y

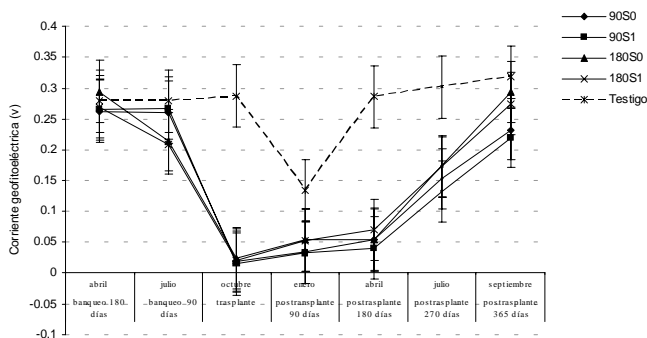


FIGURA 3. Corriente geofitoeléctrica (v) medida a través de un voltímetro, en árboles de *Pinus greggii* Engelm., bajo diferentes condiciones de trasplante. 90S0:90 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 90S1:90 días de banqueo al banqueo con azufre; 180S0: 180 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 180S1:180 días de banqueo previos al trasplante con azufre.

en los que únicamente se utilizó el suelo del sitio. Lo anterior se explica por el hecho de haberse regado con regularidad todos los tratamientos, de modo que se practicó un lavado del exceso de sales en el perfil del suelo (Szabolcs, 1993), minimizando con ello no sólo el estrés por déficit de humedad, sino además la posible toxicidad natural de las sales presentes. El pH del suelo se redujo en promedio de 8.72 al inicio, para finalizar en 7.98 en los tratamientos con azufre, y de 8.12 para los tratamientos sin azufre. Si bien es cierto que el descenso en el valor del pH fue importante, éste no llegó a reflejarse en el desempeño de las variables que se utilizaron para estimar el estrés en los árboles.

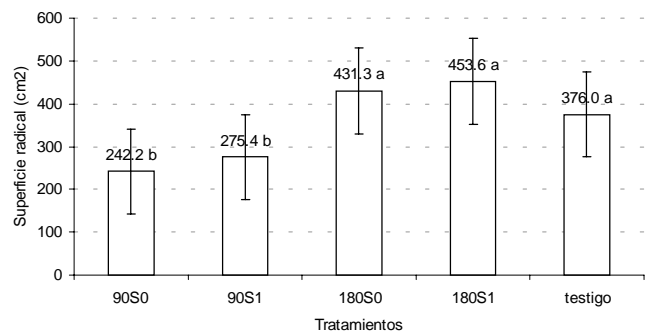


FIGURA 4. Superficie radical promedio, de árboles de *Pinus greggii* Engelm., bajo diferentes condiciones de trasplante. 90S0:90 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 90S1:180 días de banqueo previos al trasplante sin azufre; 180S0: 180 días de banqueo previos al trasplante con azufre. Valores con la misma letra son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

CONCLUSIONES

La medición de la eficiencia fotosintética probó ser un método adecuado para identificar y medir estrés post-trasplante en árboles de *Pinus greggii* Engelm.

El color verde del follaje de los árboles de pino, analizado a través de imágenes digitales, no mostró variación alguna por influencia de los factores estudiados en el experimento.

La medición de la corriente geofitoeléctrica es una alternativa útil y práctica para medir el estrés fisiológico de árboles de pino trasplantados.

Los árboles de pino banqueados 180 días antes de la plantación, se recuperaron más rápidamente del estrés provocado por las maniobras de banqueo y trasplante, que los correspondientes de noventa días.

La presencia de salinidad en el suelo no afectó el establecimiento y crecimiento de árboles de *Pinus greggii* Engelm., trasplantados, debido al riego constante.

LITERATURA CITADA

- ANONIMO. 2000. Manual técnico para la poda, derribo y trasplante de árboles y arbustos de la ciudad de México. Gobierno del Distrito Federal. Impresora Deseret. D. F., México. 144 p.
- BRAND, M. 1997. Shade influences plants growth, leaf color and chlorophyll content of *Kalmia latifolia* L., cultivars. Hortscience 32 (2) : 206-208.
- BORCHERT, R. 1994. Electrical resistance as a measure of tree water stress during seasonal drought in a tropical forest in Costa Rica. Tree Physiology 14: 299-312.
- DIXON, M. A.; THOMSON, R. G.; FEMSON, D. S. 1978. Electrical resistance measurements of water potential in avocado and white spruce. Canadian Journal of Forest Research 8: 73-80.
- FIRSCK, Y. VON; SENNERBY-FORSE, L. 1998. Seasonal fluctuations of starch in root and stem tissues of coppiced *Salix viminalis* plants grown under two nitrogen regimes. Tree Physiology 18: 243-249.
- GIRARD, S.; CLEMENT, A.; COCHARD, H.; BOULET-GERCOURT, B.; GUEHL, J. 1997. Effects of desiccation on postplanting stress in bare-root corsican pine seedlings. Tree Physiology 17: 429-435.
- GUEHL, J. M.; CLEMENT, A.; KAUSHA, P.; AUSSINAC, G. 1993. Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentrations in Corsican Pine seedlings. Tree Physiology 12: 173-183.
- LAMONTAGNE, M.; BIGRAS, F. J.; MARGOLIS, H. A. 2000. Chlorophyll fluorescence and CO₂ assimilation of black spruce seedlings following frost in different temperature and light conditions. Tree Physiology 20: 249-255.
- LILLY, S. 1999. Manual de arboricultura. Guía de estudio para la certificación del arborista. Internacional Society of Arboriculture – Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. Amalgama Arte Editorial. D. F., México.
- ORTIZ-SOLORIO, C. A. 1979. Levantamiento de suelos del campo experimental Montecillo. Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- PELTZER, D.; POLLE, A. 2001. Diurnal fluctuations of antioxidative systems in leaves of field-grown beech trees (*Fagus sylvatica*): Responses to light and temperature. Physiologia Plantarum 111: 158-164.
- PERCIVAL, G. C.; DIXON, G. R. 1997. Detection of salt and waterlogging stresses in *Alnus cordata* by measurement of leaf chlorophyll fluorescence. Journal of Arboriculture 23(5): 181-190.
- RIVERA O., P. 1988. Efecto del azufre elemental y estiércol bovino sobre la disponibilidad del fósforo y hierro en suelos calcáreos de Tamaulipas. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 106 p.
- SALGADO, M. L.; RADJA, V.; FUCIKOVKY, L. 1995. Medición del flujo geofitoeléctrico en la fitosanidad en frutales. Memoria 1995 Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Aguacate en el Estado de México. Coatepec, México. pp. 155-162.
- SZABOLCS, I. 1993. Soils and salinization, pp 3-12. In: Handbook of Plant and Crop Stress. Pessarakli, M.(ed). Marcel Dekker Inc. USA.
- TESKEY, R. O.; HICKLEY, T. M. 1986. Moisture: effects of water stress on trees, pp 9-33. In: Stress Physiology and Forest Productivity. HENNESSEY, T. C.; DOUGHERTY, P. M.; KOSSUTH, S. V.; JOHNSON, J. D. (eds.). Martinus Nijhoff Publishers. USA.
- TINUS, R. W.; BURR, K. E.; ATZMON, N.; RIOV, J. 2000. Relationship between carbohydrate concentration and root growth potential in coniferous seedlings from three climates during cold hardening and dehardening. Tree Physiology 20: 1097-1104.
- WARE, G. H. 1982. Ecological considerations in urban management. Urban forestry working group proceedings. Meeting of the Society of American Foresters. Lisle, IL. USA. pp. 312-315.
- WARGO, P. M.; SKUTT, H. R. 1975. Resistance to pulsed electric current: an indicator of stress in forest trees. Canadian Journal of Forest Research 5: 557-561.
- WARING, H. R.; SCHLASINGER, W. H. 1985. Forest Ecosystems, Concepts and Management. Academic Press. London, UK. 340 p.
- WATSON, G. 1985. Tree size affects root regeneration and top growth after transplanting. Journal of Arboriculture 11(2): 37-40.
- WATSON, G.; HEMELICK, E. B.; SMILEY, E. T. 1986. Twig growth of eight species of shade trees following transplanting. Journal of Arboriculture 12 (10): 241-245.
- WATSON, G.; SYDNOR, T. D. 1987. The effect of root pruning on the root system of nursery trees. Journal of Arboriculture 13(5): 126-130.