

ESTUDIO DE ESPECIES DE PINO PARA RESTAURACIÓN DE SITIOS DEGRADADOS

TESTING OF PINE SPECIES FOR RESTORATION OF DEGRADED SITES

Mariela Gómez-Romero^{1*}, José C. Soto-Correa², José A. Blanco-García³,
Cuahtémoc Sáenz-Romero², Javier Villegas¹, Roberto Lindig-Cisneros⁴

¹Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, ²Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, ³Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). 58030. Morelia, Michoacán, México. (margrbio13@hotmail.com). ⁴Laboratorio de Ecología de Restauración, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, CIEco UNAM Campus Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

En condiciones de pérdida extrema de suelo se requieren programas de restauración ecológica para optimar el establecimiento de cobertura vegetal y protección de suelos. Un primer paso es seleccionar especies que puedan tolerar las condiciones de sitios degradados mediante ensayos de especies. Con la finalidad de restaurar sitios severamente erosionados con presencia de cárcavas en Atécuaro, municipio de Morelia, Michoacán, México, se estableció un estudio de especies con *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*. Hubo tres condiciones de pendiente: testigo (0-5°), suave (5°-30°) y fuerte (>30°); adicionalmente hubo tres tratamientos de fertilización (fosfato de potasio, nitrato de amonio y fosfato diamónico y un testigo). El diseño experimental fue bloques completos al azar, con parcelas divididas y las especies plantadas en cuadro latino. El análisis estadístico consistió en análisis de varianza y el modelo estadístico fue simplificado eliminando los términos no significativos para todas las variables de respuesta. Se evaluó supervivencia, altura y diámetro del 2005 al 2011 y se analizó la clorofila al final. *Pinus cembroides* fue la especie de mayor supervivencia (81 %) pero crecimiento menor (76 cm), *P. pseudostrobus* mostró menor supervivencia (38 %) ($p \leq 0.0001$) y *P. devoniana* supervivencia de 80 %. *Pinus greggii* tuvo crecimiento mayor (332 cm) ($p \leq 0.0001$) y respondió a la fertilización con fosfato diamónico aumentando los niveles de clorofila *a*, *b* y *total*. El análisis de resultados sugiere que una plantación mixta de *P. devoniana* y *P. greggii* (*P. pseudostrobus* sólo en pendiente >30°) podría ser la mejor opción para restaurar estos sitios. *Pinus greggii* (exótica al área de estudio) se

ABSTRACT

In conditions of extreme soil loss, ecological restoration programs are required to optimize the establishment of vegetation and soil protection. A first step is to select species that can tolerate the conditions of degraded sites through species trials. In order to restore severely eroded sites with the presence of gullies in Atécuaro, municipality of Morelia, Michoacán, Mexico, we established a study of species with *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* and *P. pseudostrobus*. There were three slope conditions: control (0-5°), mild (5°-30°) and strong (>30°); in addition, there were three fertilization treatments (potassium phosphate, ammonium nitrate, diammonium phosphate and a control). The experimental design was of randomized complete blocks with split plots and species planted in Latin square. Statistical analysis consisted of analysis of variance and the statistical model was simplified by removing non-significant terms for all response variables. Variables were survival, height and diameter from 2005 to 2011 and analyzed chlorophyll at the end of the trial. *Pinus cembroides* was the species of longer survival (81 %) but lower growth (76 cm); *P. pseudostrobus* showed lower survival (38 %) ($p \leq 0.0001$) and *P. devoniana* 80 % survival. *Pinus greggii* recorded greater growth (332 cm) ($p \leq 0.0001$) and responded to fertilization with diammonium phosphate, increasing the levels of chlorophyll *a*, *b* and *total*. Result analysis suggests that a mixed plantation of *P. devoniana* and *P. greggii* (*P. pseudostrobus* only slope >30°) may be the best option to restore such sites. *Pinus greggii* (exotic to the study area) can be used in early stages of restoration to create favorable microsites for the establishment of endemic species such as *P. devoniana*, creating a cover to minimize erosion.

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: julio, 2012. Aprobado: octubre, 2012.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 46: 795-807. 2012.

Key words: degraded soils, revegetation, tepetate, survival, chlorophyll.

puede usar en etapas iniciales de la restauración para crear micrositios favorables para el establecimiento de especies nativas, como *P. devoniana*, creando una cobertura para minimizar la erosión.

Palabras clave: suelos degradados, revegetación, tepetate, supervivencia, clorofila.

INTRODUCCIÓN

La deforestación causa pérdida de suelos debido a la falta de protección vegetal y finalmente ocurre la erosión por viento y agua (Serrano, 2002). La pérdida de suelo depende también del porcentaje de cobertura vegetal del suelo y de la susceptibilidad a la erosión. En sitios deforestados, el proceso erosivo continúa debido al sobrepastoreo y el daño al suelo puede ser irreversible (Betancourt-Yáñez *et al.*, 2000). Esto es un problema social y económico porque la fertilidad baja de suelos degradados limita la producción de cultivos (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2003). En México, la actividad forestal se centra principalmente en el género *Pinus* porque representa 60 % de las especies maderables comerciales por su amplia distribución geográfica y su valor económico alto. La cosecha de madera y celulosa anual legal equivale en México a 6.9 millones m³, de los cuales 85 % proviene de especies de pinos. La cosecha anual total de madera (legal o ilegal) representa 43 millones m³, de los cuales 66 % es cosechado informalmente para leña combustible (Caballero-Deloya, 2010), causando serios problemas de deforestación. En el estado de Michoacán, la causa principal es el cambio del uso de suelo, los incendios forestales y la tala ilegal. La deforestación causa pérdidas de 260 000 ha por año en bosques templados (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004).

El deterioro creciente de los recursos forestales en México y la erosión asociados al cambio de uso del suelo y a prácticas agropastoriles inadecuadas, hacen necesario reforestar eficientemente para fines comerciales, para la recuperación de suelos y la restauración ecológica (Cetina-Alcalá *et al.*, 1999); la pérdida de suelo y la formación de cárcavas es un problema global (Nagasaka *et al.*, 2005; Zhang y Dong, 2010). Sin embargo, una plantación convencional puede no ser adecuada en condiciones de pérdida extrema de suelo, en particular si hay cárcavas. En estas superficies

INTRODUCTION

Deforestation causes soil loss due to lack of plant protection that favors wind and water erosion (Serrano, 2002). Soil loss also depends on the percentage of ground plant cover and susceptibility to erosion. In deforested sites, the erosion process continues due to overgrazing, and soil damage may be irreversible (Betancourt-Yáñez *et al.*, 2000). This is a social and economic problem because low fertility of degraded soils limits crop production (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2003). Forestry in Mexico is mostly focused on the genus *Pinus* since it represents 60 % of commercial timber species for its broad geographic distribution and high economic value. Legal timber and cellulose harvest per year in Mexico is equivalent to 6.9 million m³, of which 85 % comes from pine species. The total annual timber harvest (legal or illegal) is 43 million m³, of which 66 % is harvested informally for fuelwood (Caballero-Deloya, 2010), causing serious deforestation problems. In the state of Michoacán, the main cause is land use change, forest fires and illegal logging. Deforestation causes losses of 260 000 ha per year in temperate forests (Sáenz-Romero and Lindig-Cisneros, 2004).

The increasing deterioration of forest resources in Mexico and erosion associated with land use change and inadequate agropastoral practices make it necessary to efficiently reforest for commercial purpose, soil remediation and ecological restoration (Cetina-Alcalá *et al.* 1999); the loss of soil and gully formation is a global issue (Nagasaka *et al.*, 2005, Zhang and Dong, 2010). However, conventional planting may not be suitable in extreme conditions of soil loss, particularly when gullies are present. On these surfaces, more complex ecological restoration programs are required to optimize the successful establishment of plant cover and soil protection. In the vast majority of very disturbed surfaces, you cannot restore the original vegetation, but it is possible to induce the development of protective vegetation that allows conserving and enhancing soil fertility (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). It is therefore necessary to add fertilizer to return to the ground at least a small fraction of the nutrients lost. Plants under stress conditions tend to lose photosynthetic capacity and decrease the chlorophyll content of leaves (Carter and Knapp,

se requieren programas de restauración ecológica más complejos que optimicen el establecimiento exitoso de la cubierta vegetal y protección de suelos. En la gran mayoría de las superficies muy alteradas no es posible restaurar la vegetación original, pero se puede inducir el desarrollo de vegetación protectora que permita conservar y aumentar la fertilidad del suelo (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Por ello es necesario adicionar fertilizantes para regresar al suelo al menos una parte mínima de los nutrientes perdidos. Las plantas sometidas a estrés, tienden a perder capacidad fotosintética y disminuir el contenido de clorofila de sus hojas (Carter y Knapp, 2001). La clorofila *total* es la suma de las clorofilas *a* y *b*. La clorofila *a* es el pigmento principal y su presencia en cantidades adecuadas en las hojas y otros tejidos fotosintéticos es fundamental para el crecimiento de las plantas y es un pigmento activo. La clorofila *b* absorbe la luz en diferente longitud de onda, la luz se transfiere después a la clorofila *a* que la transforma en energía; la clorofila *b* es un pigmento accesorio y forma parte de las antenas recolectoras (García-Breijo *et al.*, 2006; Cambrón-Sandoval *et al.*, 2011).

Un primer paso en una reforestación es seleccionar especies mediante estudios de aquellas que puedan tolerar las condiciones de los sitios de interés (Zobel y Talbert, 1992), considerando también las necesidades de las poblaciones humanas locales. Por lo anterior, se estableció un estudio de especies de pino (*Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*) en el Ejido de Atécuaro, Morelia, Michoacán, en un paraje que presenta pérdida grave de suelo. Las especies se seleccionaron para tener un intervalo de características deseables de especies de pino como su capacidad de sobrevivir en un sitio altamente degradado y crecer satisfactoriamente para proveer productos maderables a las poblaciones locales. Por tanto, se probaron especies altamente resistentes a la sequía. *Pinus cembroides* está en regiones semiáridas (Farjón *et al.*, 1997; Constante-García *et al.*, 2009), puede crecer en suelos pobres y es altamente resistente al estrés hídrico (Constante-García *et al.*, 2009) que es común en sitios con pérdida de suelo (Ferrari y Wall, 2004); *P. greggii* var. *australis* (Donahue y López-Upton, 1999), no es endémico de Michoacán, está en sitios con precipitación baja (López-Upton y Muñoz, 1991; López-Upton *et al.*, 2005), puede crecer en suelos pobres (López-Upton *et al.*, 2004) y tiene un

2001). *Total chlorophyll* is the sum of chlorophylls *a* and *b*. Chlorophyll *a* is the major pigment and its presence in appropriate amounts in the leaves and other photosynthetic tissues is essential for plant growth and it is an active pigment. Chlorophyll *b* absorbs light in different wavelength and light is then transferred to chlorophyll *a* which transforms it into energy. Chlorophyll *b* is an accessory pigment and is part of the collecting antennae (García-Breijo *et al.*, 2006; Cambrón-Sandoval *et al.*, 2011).

A first step in a reforestation program is to select species by testing those that can tolerate the conditions of the sites of interest (Zobel and Talbert, 1992), also considering the needs of local human populations. Therefore, we conducted a research with pine species (*Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* and *P. pseudostrobus*) in a site undergoing severe soil loss, in the Ejido of Atécuaro, Morelia, Michoacán. We selected the tested species to have a range of desirable characteristics of pine species as to their ability to survive in a highly degraded site and successfully grow to provide timber products to local populations. Therefore, we tested highly drought-resistant species. *Pinus cembroides*, found in semiarid regions (Farjón *et al.*, 1997, Constante-García *et al.*, 2009), can grow in poor soils, and is highly resistant to water stress (Constante-García *et al.*, 2009) which is common in sites with soil loss (Ferrari and Wall, 2004); *P. greggii* var. *australis* (Donahue and López-Upton, 1999), is not native to Michoacán, found in sites with low precipitation (López-Upton and Muñoz, 1991; López-Upton *et al.*, 2005), can grow in poor soils (López-Upton *et al.*, 2004) and has significant growth potential (López-Upton *et al.*, 2005). On the other end of the tolerance range, we tested *P. pseudostrobus* that is not very resistant to drought, but in appropriate places it shows high rates of growth (López-Upton, 2002) and is the most desired species by local communities for reforestation. An intermediate species in resistance to stress is *P. devoniana* (also known as *P. michoacana*), which is distributed locally in Michoacán (SEMARNAP, 2000) and is probably less resistant to drought than *P. cembroides* and *P. greggii*, but more than *P. pseudostrobus*, with higher growth potential than *P. cembroides*, but probably less than *P. greggii* and *P. pseudostrobus* in normal conditions.

potencial de crecimiento importante (López-Upton *et al.*, 2005). En el otro extremo del intervalo, se ensayó *P. pseudostrobus* que resiste poco el estrés por sequía, pero en sitios apropiados presenta tasas elevadas de crecimiento (López-Upton, 2002) y es la especie más deseada por las comunidades humanas locales para las reforestaciones. Una especie intermedia en cuanto a resistencia al estrés sería *P. devoniana* (también conocida como *P. michoacana*), se distribuye localmente en Michoacán (SEMAR-NAP, 2000), y es probablemente menos resistente a sequía que *P. cembroides* y *P. greggii*, pero más que *P. pseudostrobus*, con un potencial de crecimiento superior a *P. cembroides* pero probablemente inferior a *P. greggii* y *P. pseudostrobus* en condiciones normales.

Los objetivos de este estudio fueron seleccionar la especie con sobrevivencia y crecimiento mayor en un sitio con suelo degradado, cuantificar el efecto de la pendiente en la supervivencia y crecimiento, y determinar la respuesta de las cuatro especies de pino a la fertilización en el contenido de clorofila. La hipótesis fue que *P. greggii* y *P. cembroides*, que son las especies más resistente al estrés por sequía, obtendrían mayor supervivencia que *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*. En términos de crecimiento se esperaba que *P. greggii* y *P. pseudostrobus* presentaran mayor crecimiento que *P. cembroides* y *P. devoniana*, el caso de la última especie es porque presenta un estado cespitoso que puede durar varios años. Las especies tendrían un desempeño mejor en sitios con 0-5° y el contenido de clorofila sería mayor en las plantas con tratamiento de fertilización dual de fósforo y nitrógeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

En junio del 2005 se inició un estudio con cuatro especies de pinos: *P. cembroides* (procedente de Quechulac, Municipio Ortega González, estado de Puebla), *P. greggii* (procedente de Pueblo Viejo, Municipio de Queréndaro, Michoacán), *P. devoniana* (procedente de San Miguel Charahuén, Municipio de Pátzcuaro, Michoacán) y *P. pseudostrobus* (procedente de Jeráguaro, Municipio de Zinapécuaro, Michoacán). Para el estudio se seleccionaron 144 plantas de cada especie, aproximadamente de la misma edad (20 meses para cada una, excepto *P. greggii* con 17 meses). Fueron 576 plantas más 120 plantas adicionales de *P. devoniana* usadas como faja de protección. Plantas de las cuatro especies se plantaron en junio del 2005 en un sitio degradado, en su mayoría desprovisto de vegetación, con numerosas cárcavas, seve-

The objectives of this study were to select the best species in terms of survival and growth in a degraded soil site, quantify the effect of the slope in relation to these factors and determine as well the response of the four species of pine in chlorophyll content to fertilization. The hypothesis was that *P. greggii* and *P. cembroides*, species that are more resistant to drought, would survive longer than *P. devoniana* and *P. pseudostrobus*. In terms of growth, we expected that *P. greggii* and *P. pseudostrobus* presented greater growth than *P. cembroides* and *P. devoniana*; in the case of the latter species, because it has a grass stage that can last several years. The species would have better performance in 0-5° slopes and the chlorophyll content would be greater in plants under dual fertilization treatment of phosphorus and nitrogen.

MATERIALS AND METHODS

In June 2005, a study was started with four pine species: *P. cembroides* (from Quechulac, Ortega González municipality, state of Puebla), *P. greggii* (from Pueblo Viejo, Queréndaro municipality, Michoacán), *P. devoniana* (from San Miguel Charahuén, municipality of Pátzcuaro, Michoacán) and *P. pseudostrobus* (from Jeráguaro, Zinapécuaro municipality, Michoacán). For the study, we selected 144 plants from each species, approximately the same age (20 months for each, except *P. greggii*, 17 months). There were 576 plants plus 120 plants of *P. devoniana* used as a protection strip. Plants of all four species were planted in June 2005 in a degraded site, mostly devoid of vegetation, with numerous gullies, severely eroded, dominated by acrisols (ochric acrisol). The site is located in Huertitas in the Ejido of Atécuaro (19° 33' 05" and 19° 37' 08" N and 101° 05' 07" W, and 2275 m altitude). The area has a subhumid climate, with summer rainfall, annual average temperature of 13.8 °C and annual average rainfall of 1000 mm (Werner *et al.*, 2007). The area is very heterogeneous with respect to slopes; so we took into account three slope conditions: 1) flat spots (0-5°), which preserve part of the soil, very compacted by overgrazing and this condition can be considered as a control, 2) intermediate slope (5-30°), and 3) steep slope (>30°), both with total loss of organic soil (gullies). There were 48 plants of each species per slope.

In the third year of the experiment (2008), we performed fertilization treatments using potassium phosphate (KH_2PO_4) as a source of phosphorus (P+N-) ($15.84 \text{ g year}^{-1}$), ammonium nitrate (NH_4NO_3) as a source of nitrogen (P-N+) ($18.12 \text{ g year}^{-1}$) and diammonium phosphate [$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$] as a source of nitrogen and phosphorus (P+N+) (18 g

ramente erosionado, dominado por acrisoles (acrisol ócrico). El sitio está en el paraje Huertitas en el Ejido Atécuaro (19° 33' 05" y 19° 37' 08" N y 101° 05' 07" O y altitud de 2275 m). La zona tiene un clima subhúmedo, con lluvias en verano, temperatura media anual de 13.8 °C y precipitación media anual de 1000 mm (Werner *et al.*, 2007). El área es muy heterogénea con respecto a las pendientes, por lo que se tomaron en cuenta tres condiciones de pendiente: 1) sitios planos (0-5°), donde se conserva parte del suelo, está muy compactado por el sobrepastoreo y esta condición puede considerarse como testigo, 2) pendiente intermedia (5-30°), y 3) pendiente pronunciada (>30°), ambas con pérdida total de suelo orgánico (cárcavas). Se usaron 48 plantas de cada especie por cada pendiente.

Al tercer año de establecido el experimento (2008) se realizó fertilización con fosfato de potasio (KH_2PO_4), como fuente de fósforo (P+N-) (15.84 g año⁻¹), nitrato de amonio (NH_4NO_3), como fuente de nitrógeno (P-N+) (18.12 g año⁻¹) y fosfato diamónico [$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$], como fuente de nitrógeno y fósforo (P+N+) (18 g año⁻¹), y el testigo sin fertilizante (P-N-). La fertilización se realizó cuatro veces al mes durante la época de lluvias de junio a septiembre durante tres años (2008-2010). En cada planta las variables evaluadas cada año fueron supervivencia, altura y diámetro (basal, tomado a 2 cm del suelo), durante seis años (2005-2011). Al finalizar el experimento (2011) se analizó clorofila (*a*, *b* y *total*) para conocer si hubo diferencia en la eficiencia fotosintética, usando el método de Lichtenthaler (1987) entre especies y entre tratamientos de fertilización. La evaluación de la clorofila en experimentos sobre establecimiento de especies es útil porque las plantas sometidas a estrés tienden a perder capacidad fotosintética y el contenido de clorofila de sus hojas disminuye (Carter y Knapp, 2001).

El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con parcelas divididas, donde las parcelas son los tratamientos de condiciones de suelo. Las especies estaban arregladas en cuadro latino. Hubo 36 parcelas de 3×3 m, 12 en cada tipo de pendiente y cada parcela con 16 plantas, cuatro de cada especie (Figura 1). Se colocó una hilera de plantas de *P. devoniana* como faja de protección alrededor de cada bloque, para contrarrestar el efecto de orilla. Con los datos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) y el modelo estadístico fue simplificado eliminando los términos no significativos para todas las variables (Underwood, 1997; Crowley, 2007; Sáenz-Romero *et al.*, 2011), usando el programa R (R Development Core Team, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de resultados indica que las plantas de *P. greggii* tuvieron altura mayor (Figura 2A) 3 m más

year⁻¹), and the control without fertilizer (P-N-). Fertilizers application was four times a month during the rainy season, from June to September, for three years (2008-2010). On each plant the variables evaluated each year were survival, height and diameter (basal, taken at 2 cm soil), for six years (2005-2011). At the end of the experiment (2011) the chlorophyll content (*a*, *b* and *total*) was analyzed to know if there was a difference in photosynthetic efficiency using the method by Lichtenthaler (1987) between species and fertilization treatments. Evaluation of chlorophyll in experiments about the establishment of species is useful because stressed plants tend to lose photosynthetic capacity and the chlorophyll content of leaves decreases (Carter and Knapp, 2001).

The experimental design was of randomized complete blocks with split plots, where plots were the treatments of soil conditions. The species were arranged in a Latin square. There were 36 plots of 3×3 m, 12 in each type of slope and each plot with 16 plants, four of each species (Figure 1). A row of plants of *P. devoniana* was placed as a protection strip around each block to counteract the edge effect. With the data, we conducted a variance analysis (ANOVA) and we simplified the statistical model by removing non-significant terms for all the variables (Underwood, 1997; Crowley, 2007; Sáenz-Romero *et al.*, 2011), using R program (R Development Core Team, 2011).

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis of results indicates that *P. greggii* plants had greater height (Figure 2A), reaching more than 3 m by the end of the study and the diameter increased more than 6 cm (Figure 2B), although it was the third species in terms of survival (70 %, Figure 3). The second best height growth was for *P. pseudostrobus*, with more than 2 m, but had the lowest survival (40 %). *Pinus devoniana* presented a grass appearance during the first three years after transplantation, reaching over 1 m in height; it had the best growth in diameter and was the second best in survival with 80 %. *Pinus cembroides* was the species with the lowest growth in height and diameter, but recorded the best survival (90 %). Statistical analyses at six years of age (from the date of planting) indicate significant differences ($p \leq 0.0001$) in height and diameter between species, and survival ($\chi^2 = 77.6$).

Slope effect on growth and survival of pine species

There were slope effects on plant growth and survival, with differences in basal diameter

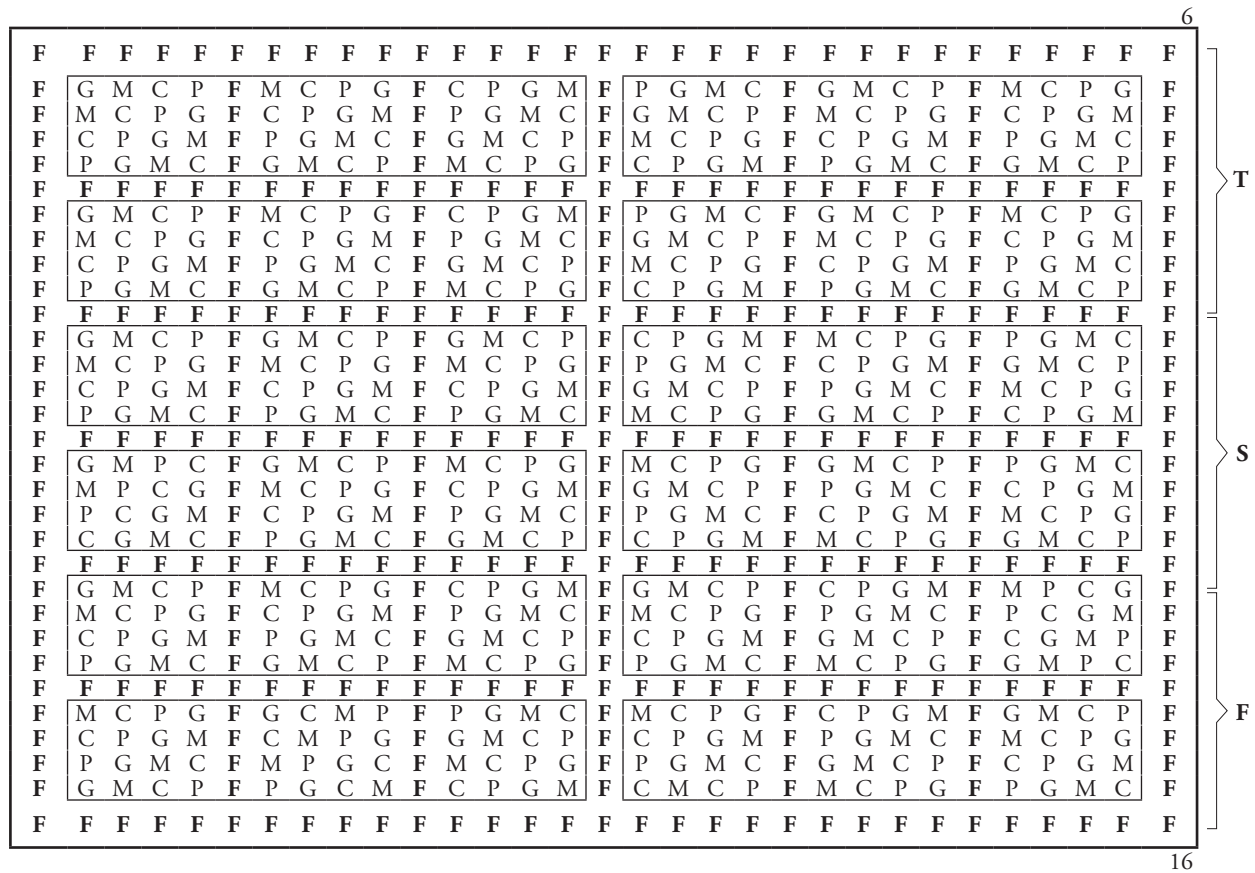


Figura 1. Diseño experimental indicando la composición de especies dentro las parcelas.

Figure 1. Experimental design indicating the composition of species within plots.

C=*P. cembroides*, G=*Pinus greggii*, M=*P. devoniana* (*P. michoacana*), P=*P. pseudostrobus*, F=faja de protección. Número de plantas por especie: 144; plantas totales: 576. Condición de las pendientes: (0-5°) testigo, (5-30°) suave y (>30°) fuerte ♦ C=*P. cembroides*, G=*Pinus greggii*, M=*P. devoniana* (*P. michoacana*), P=*P. pseudostrobus*, F=protection strip. Number of plants per species: 144; total plants: 576. Condition of slopes: (0-5°) control, (5-30°) mild, and (>30°) steep.

al finalizar el estudio y además el diámetro incrementó más de 6 cm (Figura 2B), aunque fue la tercera especie en términos de supervivencia (70 %, Figura 3). El segundo crecimiento mayor en altura fue para *P. pseudostrobus*, con más de 2 m, pero tuvo la supervivencia menor (40 %). *Pinus devoniana* presentó una forma cespitosa durante los primeros tres años después del trasplante, alcanzó más de 1 m de altura, tuvo el mejor crecimiento en diámetro y fue el segundo mejor en supervivencia con 80 %. La especie con menor crecimiento en altura y diámetro fue *P. cembroides*, pero tuvo la mejor supervivencia (90 %). Los análisis estadísticos a la edad de seis años (desde la fecha de plantación) indican diferencias altamente significativas ($p \leq 0.0001$) para la altura y diámetro entre especies y para la supervivencia ($\chi^2 = 77.6$; $p \leq 0.001$).

($p \leq 0.0001$) between slopes, but not significant in plant height. Since the slope-species interaction was significant for the diameter ($p = 0.03$), an ANOVA in each species confirmed an effect of the slope on all species ($p \leq 0.01$) (Figure 4A).

Survival showed a contrasting pattern and opposed to diameter, where the steeper the slope the greater survival, and statistically significant (Figure 4B). The analysis of the survival curves per species in relation to the slope indicates that the latter had a significant effect on *P. cembroides* ($\chi^2 = 24.8$, $p \leq 0.0001$), *P. greggii* ($\chi^2 = 18.3$, $p \leq 0.0004$), *P. devoniana* ($\chi^2 = 34.3$, $p \leq 0.0001$), and *P. pseudostrobus* ($\chi^2 = 74.3$, $p \leq 0.0001$).

Therefore, the site slope has opposite effects on two performance characteristics: the smaller the slope, the shorter survival, but higher basal diameter

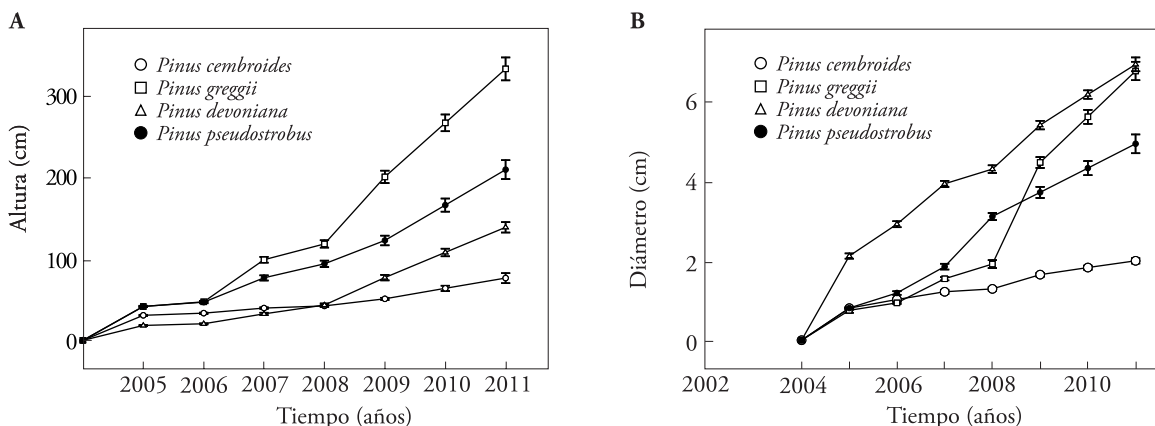


Figura 2. (A) Altura, (B) Diámetro basal de *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* (2005-2011). Las barras indican el error estándar.

Figure 2. (A) Height, (B) Basal diameter of *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* and *P. pseudostrobus* (2005-2011). Bars indicate the standard error.

Efecto de la pendiente en el crecimiento y supervivencia de las especies de pino

Hubo efectos de la pendiente en el crecimiento y supervivencia de las plantas, con diferencias entre pendientes para diámetro basal ($p \leq 0.0001$), pero no significativas para la altura de las plantas. Debido a que la interacción pendiente-especie fue significativa para el diámetro ($p = 0.03$), un ANDEVA por especie confirmó un efecto de la pendiente en todas las especies ($p \leq 0.01$) (Figura 4A).

La supervivencia presentó un patrón contrastante y opuesto al diámetro, donde a mayor pendiente mayor supervivencia y estadísticamente significativo (Figura 4B). El análisis de las curvas de supervivencia por especie en relación a la pendiente, indica que la pendiente tuvo un efecto significativo para *P. cembroides* ($\chi^2 = 24.8$, $p \leq 0.0001$), *P. greggii* ($\chi^2 = 18.3$, $p = 0.0004$), *P. devoniana* ($\chi^2 = 34.3$, $p \leq 0.0001$), y *P. pseudostrobus* ($\chi^2 = 74.3$, $p \leq 0.0001$).

Por tanto, la pendiente del sitio tiene efectos opuestos en dos características del desempeño: a menor pendiente menor supervivencia, pero mayor crecimiento en diámetro basal de las especies; a mayor pendiente, mayor supervivencia pero menor diámetro. En el caso de *P. pseudostrobus* la mayor mortalidad estuvo concentrada en sitios planos y la mejor sobrevivencia se encontró en los sitios de mayor pendiente ($>30^\circ$; Figura 4B).

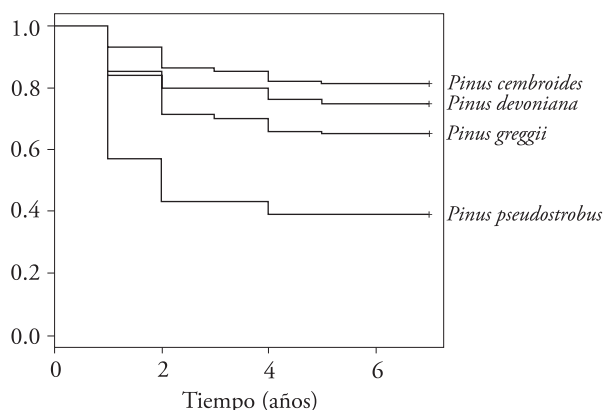


Figura 3. Supervivencia de *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* (2005-2011) en el estudio de especies.

Figure 3. Survival of *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* and *P. pseudostrobus* (2005-2011) in the study of species.

growth of the species; the steeper the slope, the greater survival but smaller in diameter. In the case of *P. pseudostrobus*, increased mortality was concentrated in flat spots and the best survival was recorded in sites of steeper slope ($>30^\circ$; Figure 4B).

Fertilization effect on Pine species performance

Fertilization had significant effects on the height of species ($p \leq 0.0001$) and basal diameter ($p = 0.023$). When analyzing species individually, we found that *P. greggii* plants fertilized with phosphorus were taller

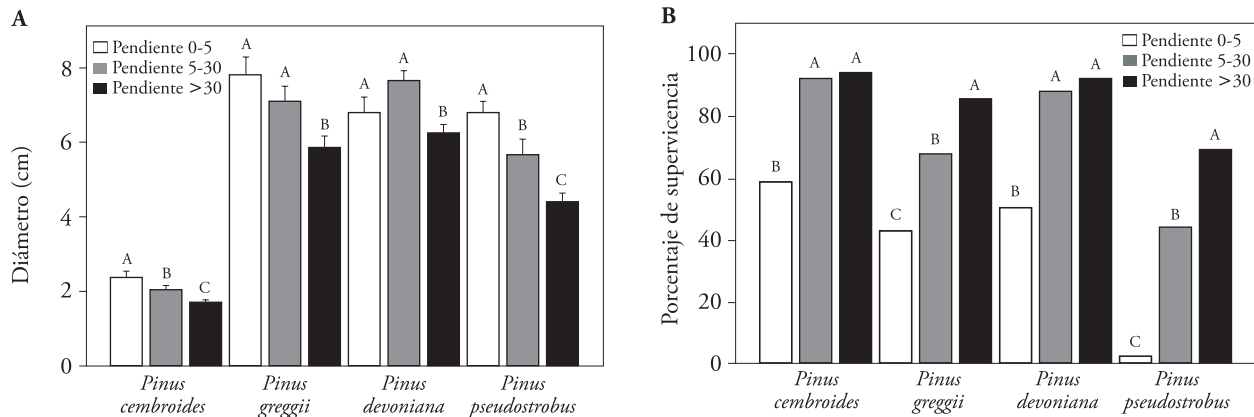


Figura 4. Diámetro (A) y supervivencia (B) de *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* en tres condiciones de pendientes (0-5°, 5-30° y >30°).

Figure 4. Diameter (A) and survival (B) of *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* and *P. pseudostrobus* in three slope conditions (0-5°, 5-30° and >30°).

Efecto de fertilización en el desempeño de las especies de pino

La fertilización tuvo efectos significativos para la altura de las especies ($p \leq 0.0001$) y el diámetro basal ($p = 0.023$). Cuando las especies se analizaron individualmente, las plantas de *P. greggii* fertilizadas con fósforo presentaron alturas de planta mayores que las fertilizadas con nitrógeno (Figura 5A), mientras que la fertilización con nitrógeno y fósforo aumentó significativamente el diámetro (Figura 5B). Para *P. devoniana* las plantas testigo (sin fertilización) presentaron menor altura pero no hubo diferencias ($p > 0.05$) entre los tratamientos con fertilización (Figura 5). Para *P. pseudostrobus* crecieron más las plantas fertilizadas con fósforo o con fósforo más nitrógeno. Para *P. cembroides* el fertilizante no cambió la respuesta de las plantas ($p > 0.05$) (Figura 5). Para todas las especies las plantas fertilizadas con nitrato de amonio presentaron valores menores de diámetro, comparadas con los otros dos tratamientos de fertilización (Figura 5B).

Efecto de fertilización en la concentración de clorofila *a*, *b* y total

El análisis de los resultados muestran diferencias significativas para la concentración de clorofila *a* entre especies ($p = 0.043$) y una respuesta positiva, marginalmente significativa al tipo de fertilizante ($p = 0.051$). La mayor concentración de clorofila

than those fertilized with nitrogen (Figure 5A), while nitrogen and phosphorus fertilization significantly increased diameter (Figure 5B). For *P. devoniana*, control plants (without fertilization) showed lower height levels but there were no differences ($p > 0.05$) between fertilization treatments (Figure 5). For *P. pseudostrobus* plants, those fertilized with phosphorus or phosphorus plus nitrogen grew more. For *P. cembroides* the fertilizer did not change plants performance ($p > 0.05$) (Figure 5). All species of plants fertilized with ammonium nitrate showed lower values in diameter compared to the other two fertilization treatments (Figure 5B).

Effect of fertilization on the concentration of chlorophyll *a*, *b* and total

The analysis of results show significant differences in chlorophyll *a* concentration between species ($p = 0.043$) and a positive, marginally significant response to the type of fertilizer ($p = 0.051$). The highest concentration of chlorophyll *a* was found in plants fertilized with nitrogen, except *P. greggii*, which has higher concentrations due to nitrogen and phosphorus fertilization $115.35 \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$, while for most species the lowest concentration occurred in unfertilized plants ($591.88 - 873.37 \text{ mg L}^{-1}$) (Figure 6A). Also there were significant differences between fertilization treatments for chlorophyll *b* ($p = 0.002$), since fertilization increased the concentration of *b*, except in *P. devoniana* which

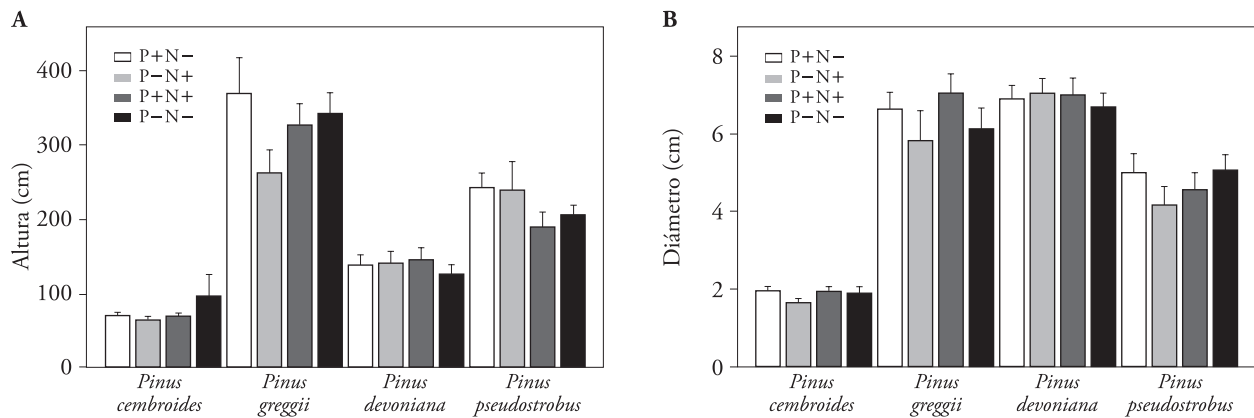


Figura 5. Altura (A) y diámetro basal (B) de *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* con tratamientos de fertilización: P+N- (fosfato de potasio), P-N+ (nitrato de amonio), P+N+ (fosfato diamónico) y P-N- (testigo). Las barras indican el error estándar.

Figure 5. Height (A) and basal diameter (B) of *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* and *P. pseudostrobus* with fertilization treatments P+N- (potassium phosphate), P-N+ (ammonium nitrate), P+N+ (diammonium phosphate) and P-N- (control). Bars indicate the standard error.

a se encontró en plantas fertilizadas con nitrógeno, excepto *P. greggii* que presenta mayores concentraciones al recibir fertilización de nitrógeno y fósforo (115.35 mg L^{-1}), mientras que para la mayoría de las especies la menor concentración ocurrió en plantas no fertilizadas ($591.88 - 873.37 \text{ mg L}^{-1}$) (Figura 6A). Para clorofila *b* también hubo diferencia significativa entre los tratamientos de fertilización ($p=0.002$), donde la fertilización incrementó la concentración en clorofila *b*, excepto en *P. devoniana* que presentó valores similares entre la fertilización dual, nitrógeno y testigo (Figura 6B). La clorofila total también mostró diferencias significativas por la fertilización ($p=0.019$). La fertilización con nitrógeno fue mejor para *P. cembroides* y *P. pseudostrobus* en la clorofila *a*, *b* y *total*. Para *P. devoniana* la fertilización con fósforo y para *P. greggii* la fertilización dual indujo una mayor concentración de clorofilas (Figura 6C). Los análisis de los resultados indicaron que la fertilización incrementa la eficiencia fotosintética en los pinos, con un efecto más evidente en *P. greggii* aumentando más del doble al fertilizar con fósforo y nitrógeno.

Pinus greggii fue la especie con más potencial por presentar la combinación de un mejor crecimiento con más de 3 m de altura y 6.7 cm de diámetro basal al finalizar el ensayo y supervivencia de 70 % después de seis años de plantación en campo. Estos resultados son congruentes con otros estudios donde esta especie tiene un gran potencial para adaptarse a condiciones limitantes (Vargas y Muñoz, 1999; Domínguez-

showed similar values between dual fertilization, nitrogen and control (Figure 6B). Total chlorophyll also showed significant differences resulting from fertilization ($p=0.019$). Nitrogen fertilization was better for *P. cembroides* and *P. pseudostrobus* in chlorophyll *a*, *b* and *total*. Phosphorus fertilization for *P. devoniana* and dual fertilization for *P. greggii* induced higher chlorophyll concentration (Figure 6C). The analysis of results indicated that fertilization increases photosynthetic efficiency in pines, which more than doubled in *P. greggii* when fertilizing with phosphorus and nitrogen.

Pinus greggii was the species with the greatest potential as it exhibited a better combination of growth, over 3 m high, and 6.7 cm in basal diameter after the trial and survival of 70 % after six years of field planting. These results are consistent with other studies that indicate that this species has great potential to adjust to limiting conditions (Vargas and Muñoz, 1999; Domínguez-Calleros *et al.*, 2001). However, *P. greggii* is not native to the study site and there may be opposition to its use for ecological restoration purpose, particularly if priority is given to restore native vegetation. *Pinus devoniana* showed good survival six years after transplantation (76 %) and is native to the site but showed slow growth, particularly during the early years (Musálem and Sánchez, 2003). According to the results, we can propose a mixed plantation in at least three stages: first, *P. greggii* to quickly develop a canopy that

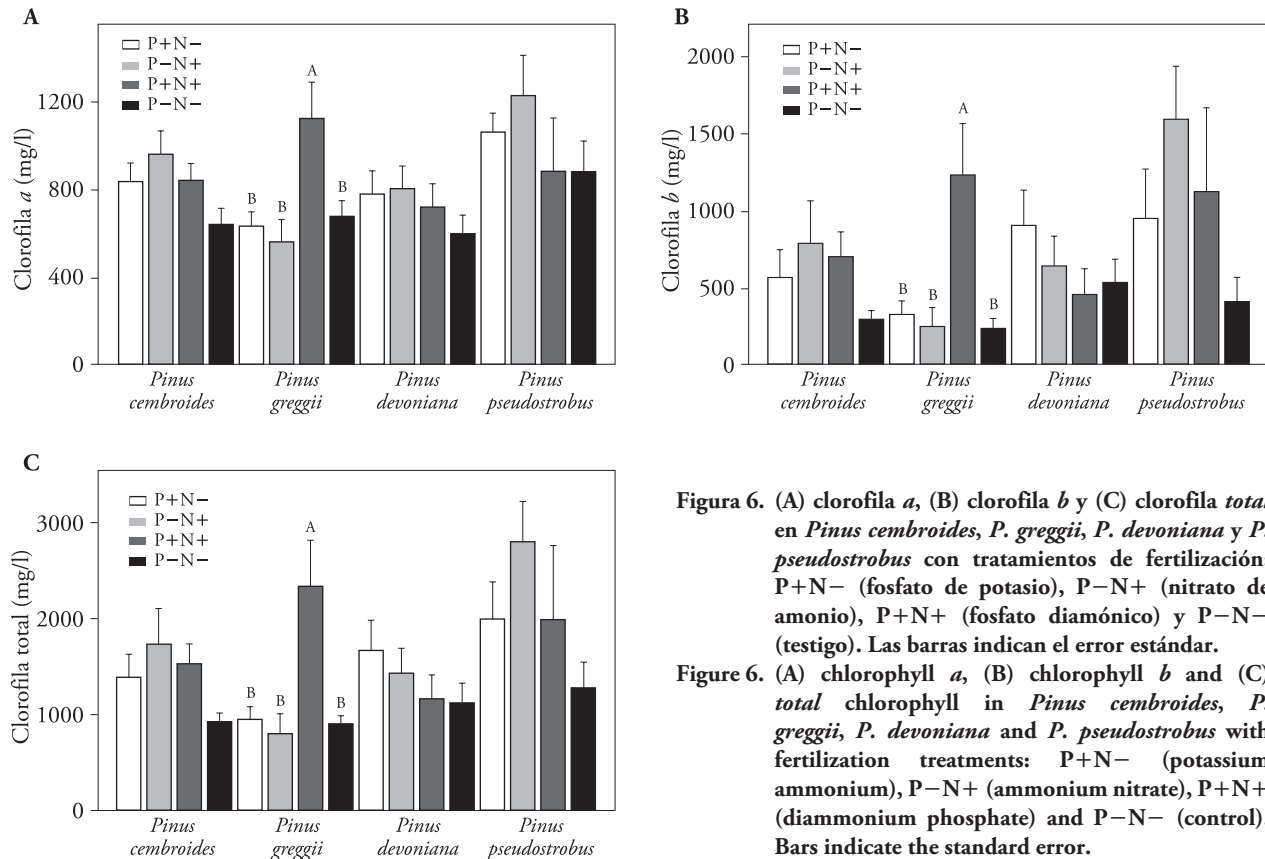


Figura 6. (A) clorofila *a*, (B) clorofila *b* y (C) clorofila total en *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* con tratamientos de fertilización: P+N- (fosfato de potasio), P-N+ (nitrato de amonio), P+N+ (fosfato diamónico) y P-N- (testigo). Las barras indican el error estándar.

Figure 6. (A) chlorophyll *a*, (B) chlorophyll *b* and (C) total chlorophyll in *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *P. devoniana* and *P. pseudostrobus* with fertilization treatments: P+N- (potassium ammonium), P-N+ (ammonium nitrate), P+N+ (diammonium phosphate) and P-N- (control). Bars indicate the standard error.

Calleros *et al.*, 2001). Sin embargo, *P. greggii* no es nativa del sitio de estudio y puede haber oposición a ser usada para restauración ecológica, particularmente si se da prioridad a restaurar vegetación endémica. *Pinus devoniana* presentó buena supervivencia a los seis años después del trasplante (76 %) y es nativa al sitio pero presentó lento crecimiento, particularmente durante los primeros años (Musálem y Sánchez, 2003). De acuerdo con los resultados se puede proponer una plantación mixta en al menos tres etapas: en la primera, *P. greggii* para que desarrolle un dosel con rapidez que proteja y forme suelo; en la segunda, probablemente cuatro años después, *P. devoniana*; y en la tercera, remover *P. greggii*, dependiendo del grado de prioridad que tuviera restablecer sólo especies nativas.

Pinus pseudostrobus mostró menor la supervivencia (38 %) pero cuando se plantó en pendientes pronunciadas la supervivencia fue mejor (68 % en pendientes pronunciadas y 2 % en sitios planos). Si se desea esta especie en una reforestación, se puede compensar su mortalidad alta en este sitio y en estas condiciones, plantando a mayor densidad.

protects and form soil; the second, probably four years later, *P. devoniana*; and in the third, removing *P. greggii*, depending on the degree of priority that the restoration of only native species had.

Pinus pseudostrobus showed lower survival (38 %), but when planted on steep slopes, its survival was better (68 % on steep slopes and 2 % on flat spots). If this species is desirable in reforestation, it is possible to compensate its high mortality in this site and under these conditions, by planting with higher density. *Pinus cembroides* presented slower growth, natural of the species, but survival was better (81 %), which is because the species has a slow natural growth and high resistance to drought (Domínguez-Calleros *et al.*, 2001). This species is commercially important for its edible seed production (pinion) of high nutritional value. Its performance in these types of sites can be promising because it supplies the domestic market with over 90 % of pinions (CONABIO, 2006).

The results of this study suggest that the four pine species could be a little more protected from insolation on steep slopes (>30°) than those on slopes 0-5°; therefore they survive longer but grow

Pinus cembroides presentó crecimiento más lento, natural de la especie, pero la supervivencia fue mejor (81 %), lo cual se debe a que la especie presenta un crecimiento lento natural y una resistencia alta a la sequía (Domínguez-Calleros *et al.*, 2001). Esta especie es importante comercialmente por su producción de semilla comestible (piñón) con valor nutricional alto. Su desempeño en este tipo de sitios sería prometedor ya que abastece más del 90 % de los piñones en el mercado nacional (CONABIO, 2006).

Los resultados del presente estudio sugieren que las cuatro especies de pino podrían estar un poco más protegidas en pendientes pronunciadas (>30°) de la insolación que aquellas con pendientes de 0 a 5°, por lo cual sobreviven más pero crecen menos en diámetro basal. La supervivencia de muchas especies de plantas está asociada con las variables ambientales del micrositio, entre las cuales destacan temperatura, luz, humedad y nutrientes (Price *et al.*, 2001). Por ejemplo, al comparar la supervivencia de *P. ponderosa* en un sitio plano y una ladera (pendiente de 20° con exposición este) el sitio plano presentó supervivencia muy baja (3 %), pero en las pendientes la supervivencia y crecimiento fue mejor hasta 97 % (Tejera y Davel, 2004). Esto es porque las pendientes están menos expuestas a los rayos solares (30°), y por tanto más húmedas y con temperaturas menores (Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo, 2004). Así, la baja disponibilidad de agua en el suelo podría ser una limitante para el desempeño de los árboles como ocurre en la temporada de sequía, pues la falta de agua limita el crecimiento y la productividad de especies de pino (Flores y Allen, 2004). La disponibilidad de agua tiene un efecto directo sobre las plantas al disminuir su turgor e indirectamente limita el incremento de biomasa, por lo cual una cantidad adecuada de agua disponible es esencial para una productividad alta (Shibu *et al.*, 2003). La disponibilidad de agua durante el primer año de establecimiento es el factor principal responsable de la supervivencia y desarrollo de especies arbóreas usadas en reforestación (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004). El crecimiento y supervivencia de las plantas se mejora mediante fertilización, lo cual se reflejó en el crecimiento y la eficiencia fotosintética en el presente estudio, evaluada indirectamente a través de las concentraciones de clorofila *a*, *b* y *total* y coincide por lo reportado por Cambrón-Sandoval *et al.* (2011). Hay mayor

less in basal diameter. The survival of many plant species is associated with microsite environmental variables, among which temperature, light, moisture and nutrients stand out (Price *et al.*, 2001). For example, when comparing *P. ponderosa* survival on a flat site and a slope (slope of 20° overlooking east), the flat site presented a very low survival (3 %), while in the slopes survival and growth were significantly higher, up to 97 % (Tejera and Davel, 2004). This is because slopes exposure to sunlight is lower (30°), and therefore are wetter and under cooler temperatures (Ramírez-Contreras and Rodríguez, 2004). Thus, the low availability of water in the soil could be a limiting factor for the performance of the trees, as it is the case in the dry season, because it affects growth and productivity of pine species (Flores and Allen, 2004). The availability of water has a direct effect on the plants by reducing their swelling and indirectly limiting the increase in biomass, whereby an adequate amount of available water is critical for high productivity (Shibu *et al.*, 2003). The availability of water during the first year of establishment is the main factor responsible for the survival and growth of tree species used in reforestation (Sáenz-Romero and Lindig-Cisneros, 2004). Growth and survival of plants is improved through fertilization; they were reflected in the growth levels and photosynthetic efficiency recorded in the present study, assessed indirectly through the concentrations of chlorophyll *a*, *b* and *total*, matching with those reported by Cambrón-Sandoval *et al.* (2011). There is higher photosynthetic efficiency when plants undergo nitrogen fertilization, but in *P. greggii*, with phosphorus and nitrogen fertilization there was a significantly higher photosynthetic efficiency but lower growth. The analysis of results suggests that with dual fertilization, energy expenditure aims to remain photosynthetically active but not to grow.

CONCLUSIONS

In sites with severe erosion and gully presence, it is necessary to implement ecological restoration programs to optimize the establishment of vegetation and soil protection. To this end, it is necessary to select species tolerant to extreme conditions of degraded sites by testing those having the ability to create microenvironmental conditions favoring these sites. A mixed plantation (*Pinus devonianana* and *P.*

eficiencia fotosintética cuando las plantas están fertilizadas con nitrógeno pero en *P. greggii* fertilizada con fósforo y nitrógeno hubo una eficiencia fotosintética significativamente mayor pero menor crecimiento. El análisis de resultados sugiere que con fertilización dual su gasto energético está dirigido a mantenerse fotosintéticamente activo pero no a crecer.

CONCLUSIONES

En sitios con problemas severos de erosión y presencia de cárcavas es necesario implementar programas de restauración ecológica que optimicen el establecimiento de cobertura vegetal y protección de suelos, para lo cual se requiere seleccionar especies tolerantes a condiciones extremas de sitios degradados, evaluando especies con capacidad de crear condiciones microambientales que favorezcan estas condiciones extremas. Una plantación mixta (*Pinus devonianana* y *P. greggii*) podría representar la mejor opción para restaurar este tipo de sitios. *Pinus greggii* (exótica en el área de estudio) se puede usar en las primeras etapas de la restauración para crear micrositios favorables para el establecimiento de especies endémicas como *P. devonianana* (y *P. pseudostrobus* sólo en pendiente $>30^\circ$). Así se podría revertir en parte el grave problema de erosión, reducir la pérdida de suelo y la formación de cárcavas al aumentar la supervivencia y desempeño de las plantas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del Fondo Sectorial CONACYT-SEMARNAT (2002-C01-0760), de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH y CONACYT por las becas de postgrado otorgadas a MGR y JCSC. Se agradece la ayuda en el trabajo de campo de Víctor Hugo Cambrón Sandoval y los valiosos comentarios del Ing. Víctor Quiñones y Melchor Medina Galván, Comisión Forestal de Michoacán, en la selección de especies a ensayar.

LITERATURA CITADA

Acevedo-Sandoval, O., L. Ortiz-Hernández, D. Flores-Román, A. Velásquez-Rodríguez, y K. Flores-Castro. 2003. Caracterización física y química de horizontes endurecidos (tepetates) en suelos de origen volcánico del Estado de México. *Agrociencia* 37(5): 435-449.

Betancourt-Yáñez, P., J. L. Oropeza-Mota, B. Figueroa-Sandoval, V. Ordaz-Chaparro, C. Ortiz-Solorio, y A. Hernández-Garay. 2000. Pérdida de suelo y potencial hidrológico en

greggii) may be the best option for the restoration of such sites. *Pinus greggii* (exotic in the study area) can be used in the early stages of restoration to create favorable microsites for the establishment of endemic species, such as *P. devonianana* (and *P. pseudostrobus* only in $>30^\circ$ slope). Thus, it could be possible to partially reverse the serious problem of erosion, and thus reduce soil loss and gully formation by increasing plant survival and performance.

—End of the English version—



parcelas con coberturas vegetativas de especies forrajeras. *Terra* 18 (3): 263-275.

Caballero-Deloya, M. 2010. La verdadera cosecha maderable en México. *Rev. Mex. Ciencias For.* 1(1): 5-16.

Cambrón-Sandoval, V. H., M. L. España-Boquera, N. M. Sánchez-Vargas, C. Sáenz-Romero, J. J. Vargas-Hernández, y Y. Herrerías-Diego. 2011. Producción de clorofila en *Pinus pseudostrobus* en etapas juveniles bajo diferentes ambientes de desarrollo. *Rev. Chapingo, Serie Ciencias Forestales* 17 (2): 253-260.

Carter, G., and A. Knapp. 2001. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.* 88(4): 677-684.

Cetina-Alcalá, V., V. González-Hernández, y J. Vargas-Hernández. 1999. Manejo en vivero de *Pinus greggii* Engelm. y la calidad de planta. *Agrociencia* 33(4): 423-430.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2006. *Pinus cembroides*. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/54-pinac11m.pdf.

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2005. Informe Nacional de México para la evaluación de los Recursos Forestales Mundiales. <http://www.fao.org/forestry/media/8859/0/176/>.

Constante-García, V., J. Villanueva-Díaz, J. Cerano-Paredes, E. H. Cornejo-Oviedo, y S. Valencia-Manzo. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia For. Méx.* 34(106): 1-39.

Crawley, M. 2007. *The R Book*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 949 p.

Dominguez-Calleros, P. A., J. J. Nívar Cháidez, y J. A. Loera-Ortiz. 2001. Comparación del rendimiento de pinos en la reforestación de sitios marginales en Nuevo León. *Madera y Bosques* 7(1): 27-35.

Donahue, J. K., and López-Upton, J. 1999. A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in México. *SIDA* 18(4): 1083-1093.

Farjón, A., J. A. Pérez de la Rosa, y B. T. Styles. 1997. Guía de Campo de los Pinos de México y América Central. The Royal Botanic Gardens, Kew producido en auspicio con el Instituto Forestal de Oxford, Universidad de Oxford. 151 p.

Ferrari, A. E., y L. G. Wall. 2004. Utilización de árboles fijadores

- de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. *Rev. Fac. Agron.* 105(2): 63-87.
- Flores, F. J., y H. K. Allen. 2004. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque* 25(3): 11-24.
- García-Breijo F., J. Roselló, y J. Caselles. 2006. Introducción al Funcionamiento de las plantas. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 181 p.
- Lichtenthaler, H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *In: Packer, L. and R. Douce (eds.). Methods in Enzymology, Plant Cell Membranes*, Vol. 148. Academic Press, San Diego, California. pp: 350-382.
- López-Upton, J., y A. Muñoz. 1991. Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. I. Evaluación en plántula. *Agrociencia, Serie Fitociencia* 2(2): 111-123.
- López-Upton, J. 2002. *Pinus pseudostrobus* Lindl. *In: Vozzo, J. A. (ed). Tropical Tree Seed Manual*. USDA Forest Service. pp: 636-638.
- López-Upton, J., C. Ramírez-Herrera, O. Plascencia-Escalante, y J. Jasso-Mata. 2004. Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38(4): 457-464.
- López-Upton, J., J. K. Donahue, F. O. Plascencia-Escalante, and C. Ramírez-Herrera. 2005. Provenance variation in growth characters of four subtropical pine species planted in Mexico. *New Forests* 29: 1-13.
- Musálem, M., y O. Sánchez. 2003. Monografía de *Pinus michoacana* Martínez. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro. Campo Experimental del Valle de México. El Horno, Chapingo, México. 230 p.
- Nagasaka, A., S. Yanai, H. Sato, and S. Hasegawa. 2005. Soil erosion and gully growth associated with cultivation in southwestern Hokkaido, Jap. *Ecol. Eng.* 24: 503-508.
- Price, T. D., N. E. Zimmermann, P. Van Der Meer, M. J. Lexer, P. Leadley, I. T. M. Jorristma, J. Schaber, D. F. Clark, P. Lasch, S. McNulty, W. Jianguo, and B. Smith. 2001. Regeneration in gap models: Priority issues for studying forest responses to climate change. *Climatic Change* 3-4 (51): 475-508.
- R Development Core Team. 2011. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org>.
- Ramírez-Contreras, A., y D. A. Rodríguez-Trejo. 2004. Efecto de la calidad de la planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1): 5-11.
- Sáenz-Romero, C., J. Beaulieu, y G. E. Rehfeldt. 2011. Variación genética altitudinal entre poblaciones de *Pinus patula* de Oaxaca, México, en cámaras de crecimiento simulando temperaturas de calentamiento global. *Agrociencia* 45(3): 399-411.
- Sáenz-Romero, C., y R. Lindig-Cisneros. 2004. Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita* 37: 107-122.
- SEMARNAP. 2000. (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca), Subsecretaría de Recursos Naturales, Programa Nacional de Reforestación Evaluación de la Reforestación de 1999 en el Estado de Michoacán. Reporte interno. México D.F. 18 p.
- Serrano, G. E. 2002. Contribución al conocimiento del México forestal. *Notas. Revista de Información y Análisis* 22: 7-14 p.
- Shibu, J., C. Merritt, and C. L. Ramsey. 2003. Growth, nutrition, photosynthesis and transpiration responses of longleaf pine seedling to light, water and nitrogen. *For. Ecol. Manage.* 180(10): 335-344.
- Tejera, L., y M. Davel. 2004. Establecimiento en Pino oregon en Patagonia. *Ficha Técnica. Patagonia Forestal Año IX, N° 2*. 10(2): 9-12.
- Underwood, A. J. 1997. *Experiments in Ecology: Their Logical Design and Interpretation Using Analysis of Variance*. Cambridge University Press. 504 p.
- Vargas H., J. J., y A. Muñoz O. 1991. Potencial hídrico, transpiración y resistencia estomatal en plántulas de cuatro especies de Pino. *Agrociencia, Serie Recursos Naturales Renovables* 1(3): 25-28.
- Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis-Muñoz, M. I. Alcocer-Silva, M. Gual-Díaz, y C. Sánchez-Dirzo. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO-Instituto de Ecología-UNAM. México. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/introd-J084.html
- Werner, G., M. Bravo, J. D. Etchevers, J. F. Gallardo, M. Haulon, M. Mazzoncaini, M. Petri, L. Padilla, C. Prat, J. Queitsch, A. Vera, I. Vidal, and E. Zapata. 2007. Alternative agriculture for sustainable rehabilitation of deteriorated volcanic soils in México and Chile (REVOLSO) 2002-2006; INCO-DEV (International Cooperation with Developing Countries 1998-2002). Final report. Univ. Giessen Giessen, (Alemania). pp: 123-128.
- Zhang, J. T., and Y. Dong. 2010. Factors affecting species diversity of plant communities and the restoration process in the loess area of China. *Ecol. Eng.* 36(3): 345-350.
- Zobel, B., y J. Talbert. 1992. *Técnicas de Mejoramiento Genético de Árboles Forestales*. Ed. Limusa. México. 545 p.