

La participación de organizaciones de productores en la fase de beneficio primario genera otra oportunidad interesante para los pequeños productores, permitiendo la existencia de un ente testigo respecto a la estructura de precios y asegurando una mayor transparencia en la distribución de utilidades al interior de la cadena agroindustrial.

La clave para aprovechar estas oportunidades de mercado consiste en alcanzar los niveles de competitividad de los grandes productores que fijan el precio del mercado internacional, Tailandia, Indonesia y Malasia. En este caso, la proximidad al mayor mercado consumidor —Estados Unidos de Norteamérica— podría significar otra oportunidad de colocación del látex natural y el eventual aprovechamiento de todo el potencial de producción existente. Es decir, los problemas en el mediano y largo plazos se relacionan con alcanzar los niveles de productividad de los grandes productores a través de la tecnificación y eficiencia en el cultivo, la mejora de la calidad y, para que los pequeños productores se apropien de los beneficios, la consolidación de las empresas con participación de las organizaciones campesinas.

La producción prevista hasta mediados de la próxima década puede ser procesada con la capacidad actual de la industria procesadora primaria, pero esto no necesariamente es válido a nivel local. En algunas localidades —Uxpanapa, Ver. y el estado de Chiapas— será necesario enfrentar este problema dentro de los próximos cinco años y promover la instalación de beneficios, para lo cual las fuentes de financiamiento y apoyo técnico disponibles son muy escasas.

La falta de calidad en la materia prima que reciben los beneficios redunda en un castigo en el precio a nivel del productor y en la necesidad de la industria procesadora de importar las mejores calidades de granulado. El precio medio obtenido por el beneficio se ve castigado por la recepción de bloques con alta cantidad de quesillo y greña que genera un producto de menor calidad. Esto es resultado del inadecuado manejo y almacenamiento de las láminas en los molinos artesanales, que generan hongos y un color inadecuado del producto. Aún cuando el color no modifica la estructura del hule, sí reduce su presentación, lo que repercute negativamente en el precio.

LITERATURA CITADA

Aguirre R. C.

- 1996 **“Manual para el Cultivo del Hule: *Hevea brasiliensis* en México”**. Consejo Mexicano del Hule, A. C., México, D. F. 168 pp.

Consejo Mexicano del Hule A. C.(CMH)

- 1995 **“Estadísticas básicas”**. México D. F. 76 pp.
- 1998 **“Estadísticas básicas”**. México D.F. 100 pp.
- 2002 **“Estadísticas básicas”**. México D.F. 90 pp.

Farías B. M.

- 2001 **“Evaluación dasométrica del árbol del hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.), con relación a las condiciones edáficas, en la región del Papaloapan, en el Estado de Oaxaca”**. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 94 pp.

Gaona C. X.

- 2000 **“Caracterización de las áreas productoras de hule natural en México (estudio de caso: Tuxtepec, Oaxaca 1997-1998)”**. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 149 pp.

Grupo Consultor Independiente (GCI)

- 1996 **“Alternativas de Comercialización Nacional e Internacional del Hule en México”**. México, D. F. 158 pp.

Martínez C. F.

- 1996a **“Gentes, tiempo y espacio”**. *In*: El hule en México. Ediciones Copilco S.A. México, D.F. p. 1-19
- 1996b **“El hule en las culturas prehispánicas”**. *In*: El hule en México. Ediciones Copilco S.A. México, D.F. p. 95-102
- 1996c **“Las lecciones de Historia”**. *In*: El hule en México. Ediciones Copilco S.A. México, D.F. p. 102-113.

Picón R. L.

- 1997 **“Manual para el Cultivo del Hule *Hevea brasiliensis*”**. SAGAR-CMH-INIFAP, Campo Experimental, El Palmar, Tezonapa, Ver. 103 pp.

Sanfilippo B. J.

- 1986 **“El juego de pelota”**. *In*: El hule en México. Ediciones Copilco S.A. México, D.F. p. 45-62.

Viesca T. C.

1986 **“El hule en la religión prehispánica”**. *In*: El hule en México. Ediciones Copilco S.A. México, D.F. p. 21-44.

Ra Ximhai

Revista de Sociedad, Cultura y
Desarrollo Sustentable

Ra Ximhai

Universidad Autónoma Indígena de México

raximhai@uaim.edu.mx

ISSN: 1665-0441

México

2005

MICROPROPAGACIÓN CLONAL *in vitro* EN *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla*

Rosa Martínez Ruiz; Hilda S. Azpíroz Rivero; José Luis Rodríguez De la O; Víctor M. Cetina Alcalá; M. A. Gutiérrez Espinosa; Jaime Sahún Castellanos

Ra Ximhai, enero-abril, año/Vol.1, Número 1

Universidad Autónoma Indígena de México

Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa

pp. 111-130

MICROPROPAGACIÓN CLONAL *in vitro* EN *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* CLONAL MICROPROPAGATION *in vitro* OF *Eucalyptus grandis* AND *E. urophylla*

Rosa Martínez-Ruiz¹; Hilda S. Azpíroz-Rivero²; José Luis Rodríguez-De la O³; Víctor M. Cetina-Alcalá⁴; M. A. Gutiérrez-Espinosa⁵; Jaime Sahagún-Castellanos⁶

¹Clarificador Educativo C. Ingeniería en Sistemas Forestales. Universidad Autónoma Indígena de México. Los Mochis, Sinaloa, México. Correo electrónico: ruizrosa@uaim.edu.mx. ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Correo electrónico: s_azpiroz@yahoo.com. ³ Depto. de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Correo electrónico: jrguez@taurus1.chapingo.mx. ⁴Especialidad Forestal, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. Correo electrónico: vicmac@colpos.mx. ⁵Especialidad de Fruticultura, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. Correo electrónico: alexge@colpos.mx. ⁶Depto. de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Correo electrónico: jsahagun@taurus1.chapingo.mx.

RESUMEN

El árbol de eucalipto (*E. urophylla* y *E. grandis*) es un recurso importante, debido a su aprovechamiento industrial en la obtención de celulosa y hemicelulosa para la fabricación de papel en varias partes del mundo en general y en particular en el sureste de México. Varios alcances biotecnológicos han sido desarrollados para solucionar las dificultades de variabilidad genética en propagación por semilla que presentan las especies de eucalipto. Para ello, resulta necesario el estudio de diversas estrategias de micropropagación que permitan la obtención y multiplicación de clones de eucalipto. Por lo que el objetivo de este trabajo fue establecer la tecnología para la micropropagación clonal *in vitro* de genotipos seleccionados, con el fin de obtener plantas de alta calidad destinadas a las plantaciones o a huertos clonales en el sureste de México. Para el establecimiento de los explantes a condiciones *in vitro* se evaluaron tiempos de desinfestación de los explantes, realizando la combinación de tres niveles de desinfección con antibiótico (terramicina 40 mg/100 ml) y con fungicida (cuprimicin 150 mg/100 ml) a 0, 10 y 30 minutos. Obteniéndose hasta un 90 % de cultivos libres de contaminación. Además se evaluó la multiplicación de brotes, la formación de callo y enraizamiento para ambas especies, combinando tres niveles de benziladenina (0.0, 1.0 y 3.0 mg L⁻¹) y de ácido naftalen acético (0.0, 1.0 y 3.0 mg L⁻¹) en un medio de cultivo Gamborg B5. Se obtuvo hasta 9 brotes por explante cultivados y una media de 5.5 raíces por explante, combinando 3 mg L⁻¹ de benziladenina y 1.0 y 3.0 mg L⁻¹ de ácido naftalen acético. Los protocolos para aclimatación de plantas fueron también establecidos.

Palabras claves: Eucalipto, *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, embriogénesis, organogénesis, propagación *in vitro*, aclimatación.

SUMMARY

The eucalyptus tree (*E. urophylla* and *E. grandis*) is an important resource which provides cellulose and hemicellulose used in paper manufacturing in various parts of the world, and particularly in southeastern Mexico. Several biotechnological advances have been developed to solve the difficulties resulting from genetic variability in seed propagation presented by the eucalyptus species. This requires the study of diverse strategies of micropropagation which permit the obtainment and multiplication of eucalyptus clones. Thus, the objective of this study was to establish the technology for the *in vitro* clonal micropropagation of selected genotypes, for the purpose of obtaining high quality plants for plantations or clonal orchards in southeastern Mexico. For the establishment of the explants to *in vitro* conditions, the disinfection times of the explants were evaluated, employing a combination of three levels of disinfections with antibiotic (terramycin 40 mg/100 ml) and with fungicide (cuprimycin 150 mg/100 ml) at 0, 10 and 30 minutes, thus obtaining up to 90% of the cultures free of contamination. In addition, an evaluation was made of the multiplication of shoots, callus formation and rooting for both species, combining three levels of benzyladenine (0.0, 1.0 and 3.0 mg L⁻¹) and of acetic naphthalene acid (0.0, 1.0 and 3.0 mg/L⁻¹) in a Gamborg B5 culture medium. As many as 9 shoots per cultivated explant were obtained, and an average of 5.5 roots per explant, combining 3 mg L⁻¹ of benzyladenine and 1.0 and 3.0 mg L⁻¹ of acetic naphthalene acid. The protocols were established for the acclimatization of the plants.

Key words: Eucalyptus, *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, embryogenesis, organogenesis, acclimation, *in vitro*, propagation.

INTRODUCCIÓN

La deforestación es uno de los problemas más graves que actualmente atraviesan las generaciones actuales, así en países de este continente se pierden hasta 300,000 ha por año de bosques nativos (FAO, 1994; Centeno, 1997), la necesidad de obtener recursos del bosque ha llevado al hombre a explotarlos en forma irracional. Esto ha obligado a los investigadores a buscar nuevas alternativas de reproducción vegetativa con altas tasas de multiplicación y buenas características tanto genotípicas como fenotípicas.

Los eucaliptos son árboles originarios de Australia con más de 600 especies, algunos de ellos comercialmente importantes para la producción de madera, pulpa para papel y aceites esenciales principalmente (Hartney, 1995). Estos han demostrado un gran potencial en plantaciones forestales comerciales por su rápido crecimiento y se cultivan en diferentes regiones tropicales del planeta, lo cual indica la bondad de su comportamiento y la adaptabilidad que tienen a condiciones ambientales muy diversas. Actualmente *E. urophylla* y *E. grandis* están siendo plantados en gran escala en regiones tropicales de México. Dada esta situación, a corto plazo podrían abastecer una gran parte de la demanda de los productos celulósicos para papel en México.

La propagación de plantas a través del uso de técnicas de cultivo de tejidos vegetales (micropropagación) constituye una de las líneas de trabajo más importante de la biotecnología moderna dada la magnitud de su aplicación práctica actual, la cual se fundamenta en la clonación del material vegetal élite. Los programas de mejoramiento genético en especies forestales de eucalipto no han sido tan efectivos como la genética de cultivos agrícolas, debido a problemas relacionados con la baja viabilidad de la semilla y los largos periodos de juvenilidad para alcanzar la madurez y floración de las plantas, las cuales impiden que las ganancias genéticas de mejoramiento sean más rápidas (McComb, 1994).

Los clones de *Eucalyptus grandis* (clon -246) y *Eucalyptus urophylla* (clon -141) presentan un bajo porcentaje de viabilidad de la semilla y un bajo porcentaje de enraizamiento de estacas en vivero, por lo que la micropropagación se perfila como una herramienta eficaz en la propagación de estos individuos selectos al permitir economizar tiempo y costos de producción de plantas forestales (Ahuja, 1993) y representa una posible solución a los problemas observados, ya que ha demostrado

incrementos sustanciales en los índices de multiplicación en períodos de tiempo relativamente cortos, lo que ofrece grandes ventajas con respecto a la captación de ganancias genéticas a través de la silvicultura clonal (Daquinta *et al.*, 2000).

Aunque resultados exitosos para la clonación *in vitro* han sido reportados para algunas especies de eucalipto (McCombo y Bennett, 1996), la fase de aclimatación y enraizamiento es frecuentemente un paso crítico y limitante (Hartney, 1995). Además, la regeneración de brotes a través de cultivo *in vitro* de tejidos u órganos extirpados es también difícil de controlar para la mayoría de las especies de eucalipto (Hartney, 1995). Excepto por los pocos casos en los cuales la regeneración fue exitosa con órganos maduros como hojas de *E. citriodora* (Muralidharan y Mascarenhas, 1987), hojas y tallos de *E. gunnii* (Teulières y Boudet, 1992) y callos de hoja y tallo de *E. tereticornis* (Subbaiah y Minocha, 1990); así como la regeneración de brotes en órganos juveniles que fue reportada en *E. gunni*, *E. marginata* y *E. diversicolor* (McComb, 1994), *E. camaldulensis* (Diallo y Dohoux, 1984) y *E. nova-anglica* (Mehra, 1982).

El desarrollo de procedimientos eficientes para la micropropagación, vía organogénesis, de clones superiores de *Eucalyptus grandis* (clon -246) y *Eucalyptus urophylla* (clon -141), cuyos clones se adaptan fácilmente a las condiciones tropicales y han presentado un excelente crecimiento y vigor en los programas de plantaciones forestales comerciales en el sureste de México, permitirán el escalado de las técnicas *in vitro*, con ventajas tecnológicas y económicas sobre los sistemas convencionales de la macropropagación. Estas técnicas biotecnológicas han sido utilizadas en muchas partes del mundo para la micropropagación de diversos árboles selectos (Monteuuis, 1994, Bon y Monteuuis, 1996, Monteuuis *et al.*, 1998), sin embargo, en estas especies de *Eucalyptus grandis* (clon -246) y *Eucalyptus urophylla* (clon -141), no se conocen referencias sobre investigaciones realizadas en este campo.

Aparece en la literatura una marcada diferencia en la habilidad de las diferentes especies de eucalipto para regenerar brotes y esta habilidad permanece muy limitada de acuerdo con la mayoría de los reportes publicados. Tomando en cuenta lo anterior, se realizó el presente trabajo con el objetivo de desarrollar una tecnología rápida y eficiente para la propagación clonal *in vitro* de árboles élite de las especies *Eucalyptus grandis* (clon -

246) y *E. urophylla* (clon -141), árboles particularmente interesantes para la producción de pulpa para papel en el sureste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material donador de explantes

Se utilizaron plantas de *Eucalyptus grandis* del clon -246 y *E. urophylla* del clon-141, para la obtención de material vegetativo, proveídos por la empresa PLANFOSUR, S.A. de C.V. Estos clones presentan características de buen crecimiento y adaptabilidad en la región de las Choapas, Veracruz, México.

Después de 3 semanas de aclimatación de las plantas a condiciones de clima templado en el vivero forestal del Colegio de Postgraduados, se obtuvieron estacas —10 a 15 cm de longitud— con ápices y yemas axilares. Con el objetivo de disminuir la contaminación en condiciones *in vitro*, a los clones de eucalipto traídos de las Choapas se les aplicó en vivero un fungicida sistémico (cuprimicin 100[®] 600 mg L⁻¹), quince días antes de obtener los explantes, para iniciar el proceso de micropropagación en el laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales del Departamento de Fitotecnia perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo.

Medio de cultivo

Se empleó como medio básico el Gamborg B5 (Gamborg, 1991) y se ajustó a un pH de $5.7 \pm .1$. Para controlar la oxidación de los explantes se adicionó al medio de cultivo carbón activado 1g L⁻¹. Las sales se agregaron a un matraz Erlenmeyer que contenía agua desionizada en constante agitación incorporándose los compuestos previamente pesados. El medio de cultivo se vació en frascos de vidrio de 60 x 55 mm colocando 25 ml en cada frasco. Los frascos se taparon y se colocaron en una canastilla para su esterilización, la cual se realizó por 20 minutos en autoclave a una temperatura de 121 °C y 1 kg/cm² de presión. Posteriormente se dejó solidificar el medio a temperatura ambiente.

Establecimiento del cultivo aséptico

Desinfestación del material vegetal

Después de disectar el material vegetal (estacas), se inmergieron en una solución jabonosa preparada con detergente comercial, para poder trasladarlo al laboratorio e iniciar su desinfestación. Ya en laboratorio, la desinfestación se realizó lavando y cepillando con detergente varias veces los ápices y secciones de tallo con yemas axilares. Posteriormente se lavaron los inóculos con agua esterilizada y se mantuvieron en solución antioxidante (ácido ascórbico 100 mg L⁻¹ y ácido cítrico 150 mg L⁻¹) en un vaso de precipitado hasta el momento de la siembra.

La desinfección de los explantes —en la cámara de flujo laminar— se realizó con el siguiente procedimiento, en el cual los explantes fueron inmersos inicialmente en una solución de agua oxigenada (10%) por 7 minutos, seguido de una inmersión en una solución de hipoclorito de sodio (10%) por 10 minutos y finalmente se lavaron 5 veces con agua destilada esterilizada y se mantuvieron en un frasco con agua.

Siembra *in vitro*

Bajo condiciones asépticas las estacas desinfectadas superficialmente fueron cortadas en segmentos de 1.5 a 2 cm de longitud, los cuales incluyeron 2 yemas axilares cada uno, sembrando 5 segmentos en cada frasco de vidrio en el medio de cultivo, se taparon con tapones de polipropileno y se sellaron con parafilm.

Durante las diferentes etapas de los experimentos, los cultivos se mantuvieron en un cuarto de incubación bajo ambiente controlado a temperatura de 26 ± 2 °C durante el día y de 22 a 24 °C durante la noche, la iluminación fue proporcionada por lámparas fluorescentes DURO-TEST (LabLine) de 75 W y se ajustó a un fotoperíodo de 16 horas luz (con una intensidad luminosa de 2700-3200 lux) (Medero *et al.*, 1997) y 8 horas de oscuridad.

Diseño Experimental

Los experimentos realizados para el establecimiento de los cultivos asépticos tuvieron un arreglo factorial 3^2 (9 tratamientos) y una distribución completamente al azar para cada clon, en un diseño resultado de la combinación de tres niveles (tiempos) de desinfección (Cuadro 1) y los factores de antibiótico (terramicina 40 mg/100 ml) y fungicida (cuprimicin 150 mg/100ml), con 20 repeticiones, para un total de 180 unidades experimentales para *E. grandis* y *E. urophylla*. El período de cultivo fue de 45 días. El análisis estadístico se realizó con los datos obtenidos a los 45 días de desarrollo.

En este experimento la variable a evaluar fue la contaminación del número de los explantes debido a hongos y/o bacterias y/o oxidación de los explantes. Se realizó un análisis de varianza de un diseño completamente al azar con arreglo factorial completo. Se utilizó la prueba de rangos múltiples (Tukey, 0.05) para la comparación de medias, empleándose el paquete estadístico Statistics Analysis System (SAS, Institute Inc., 1992).

Cuadro 1. Factores y niveles utilizados en el ensayo factorial para el establecimiento aséptico del explante en *E. grandis* y *E. urophylla*.

Factores	Niveles
	Exposición en tiempo (min)
Antibiótico (terramicina 40 mg/100 ml)	0, 10 y 30
Fungicida (cuprimicin 150 mg/100ml)	0, 10 y 30

Multiplicación de propágulos

El material resultante sin contaminación obtenido durante el establecimiento aséptico se transplantó a medio de cultivo para inducir la formación de brotes, callos y raíces. Se empleó como medio básico Gamborg B5 (Gamborg, 1991) complementado con benziladenina (BA), ácido naftalen acético (ANA), tiamina 40 mg/l y ajustado a un pH de 5.7 ± 0.1

El experimento tuvo un arreglo factorial 3^2 (9 tratamientos) para cada clon de eucalipto en un diseño resultado de la combinación de 2 factores (BA y ANA) con 3 niveles de concentración (0,1 y 3 mg/L) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Factores y niveles utilizados en el ensayo factorial para multiplicación de explantes en clones de *E. urophylla* y *E. grandis*.

Factores (hormonas)	Niveles (mg/L)
BA	0, 1 y 3
ANA	0,1 y 3

Las variables evaluadas a los 45 días del experimento fueron el número de brotes, la producción de callo (gramos en peso fresco) y el número de raíces regeneradas. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza de un diseño completamente al azar con arreglo factorial completo. Se aplicó la prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la comparación de medias, mediante el paquete estadístico SAS Institute Inc. (1992).

Aclimatación

Las plantas *in vitro* de *E. urophylla* y *E. grandis* de 5-7 cm de longitud, que poseían como promedio 3 raíces y que la raíz mayor medía entre 3-5 cm aproximadamente se extrajeron de los frascos de cultivo y se colocaron en bolsas de polietileno negro de 20 x 11 cm; que contenían un suelo constituido de 70 % tierra de monte y 30 % de agrolita, las plantas se establecieron en 70 % de sombra. El riego se aplicó diariamente durante 20 días, a partir de los cuales se redujo paulatinamente hasta los 40 días en que se sacaron las plantas a pleno sol, regándolas a partir de ese momento dos veces al día.

Se aplicó fertilizante triple diecisiete, diluido en agua a los 20 días de iniciada la aclimatación, a razón de 0.1 g/planta. Se realizaron aspersiones con oxicloruro de cobre 0.3 g/L, cada siete días, aplicando 0.005 g/planta aproximadamente hasta que las plantas se sacaron del umbráculo (González *et al.*, 1987).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Establecimiento del cultivo aséptico para *E. urophylla* (clon-141) y *E. grandis* (clon-246)

A los 45 días de incubación, se establecieron los explantes libres de contaminación hasta un 90% para *E. urophylla*, el resto se perdió a causa de contaminación por: oxidación (5 %), hongos (3%) y bacterias (2%). Para el caso de *E. grandis* se estableció el 80.44% del total de los explantes libres de contaminación, el resto se perdió a causa de contaminación por: oxidación (9 %), hongos (8%) y bacterias (2.56%).

El análisis de varianza mostró que al menos uno de los tratamientos resultó estadísticamente diferente para las dos especies; es decir, que existen diferencias entre los tratamientos en el nivel de contaminación de los explantes (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentaje de contaminación de los explantes para las dos especies de eucalipto

Tx	Tratamiento con 20 repeticiones cada uno	<i>E. urophylla</i>	<i>E. grandis</i>
		Medias (explantes limpios)	Medias (explantes limpios)
1	Terramicina (10 min) y cuprimicin (10 min)	3.5 b	3.1 b
2	Terramicina (10 min) y cuprimicin (0 min)	2.8 c	2.4 c
3	Terramicina (10 min) y cuprimicin (30 min)	4.3 a	4.6 a
4	Terramicina (0 min) y cuprimicin (10 min)	3.4 b	3.2 b
5	Terramicina (0 min) y cuprimicin (0 min)	2.6 c	2.2 c
6	Terramicina (0 min) y cuprimicin (30 min)	2.4 c	2.1 c
7	Terramicina (30 min) y cuprimicin (10 min)	4.4 a	4.3 a
8	Terramicina (30 min) y cuprimicin (0 min)	2.6 c	2.2 c
9	Terramicina (30 min) y cuprimicin (30 min)	2.7 c	2.2 c

Valores con la misma letra en sentido vertical son estadísticamente iguales (Tukey=0.05).

Para poder saber cuál o cuáles son los tratamientos que nos permiten tener mejor respuesta, respecto a la obtención de explantes asépticos, para la producción de plantas de *E. urophylla* y *E. grandis in vitro*, se realizó la prueba de Tukey. En el Cuadro anterior observamos que los tratamientos con antibiótico a 10 y 30 min en combinación con cuprimicin a 10 y 30 minutos de tiempo de exposición nos permite obtener más del 90% de material sin contaminación para *E. urophylla* y 80% para *E. grandis*.

Multiplicación de propágulos (Respuesta sobre la formación de callo para *E. urophylla* (clon-141) y *E. grandis* (clon-246))

Se encontraron diferencias entre los tratamientos en la formación y crecimiento del callo después de 45 días de incubación para las dos especies. Al realizar la prueba de Tukey para la comparación de medias para *E. urophylla*, se obtuvo mayor promedio en el tratamiento 8 (3.0 mg/l de BA y 0 mg/l de ANA) con una media de 1.980 g superando al resto de los tratamientos (Cuadro 5). Para la especie *E. grandis* la respuesta fue similar obteniéndose el mayor promedio en el tratamiento 8 (3.0 mg/l de BA y 0 mg/l de ANA) con una media de 2.050 g (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores promedio de la cantidad de callo (peso fresco) para las 2 especies de eucalipto.

Número de tratamiento	Hormonas mg/L	<i>E. urophylla</i> Medias(g)	<i>E. grandis</i> Medias(g)
1	BA (1) y ANA (1)	0.350 c	0.650 c
2	BA (1) y ANA (0)	0.220 c	0.520 c
3	BA (1) y ANA (3)	0.400 c	0.620 c
4	BA (0) y ANA (1)	0.160 c	0.430 c
5	BA (0) y ANA (0)	0.120 c	0.370 c
6	BA (0) y ANA (3)	0.180 c	0.580 c
7	BA (3) y ANA(1)	1.300 b	1.700 b
8	BA (3) y ANA (0)	1.980 a	2.050 a
9	BA (3) y ANA (3)	1.200 b	1.600 b

Valores con la misma letra en sentido vertical son estadísticamente iguales (Tukey = 0.05)

Número de brotes para *E. urophylla* (clon-141) y *E. grandis* (clon-246)

Los explantes establecidos y transferidos a los medios de cultivo desarrollaron brotes cuyos resultados aparecen en el Cuadro 5. En ellos se puede observar que los mejores resultados para *E. urophylla* y *E. grandis* fueron los tratamientos 7, 8 y 9.

Cuadro 5. Número de brotes por explante en *E. urophylla* y *E. grandis*.

Número de tratamiento	Hormonas mg/L	Brotes/explante (medias)	
		<i>E. urophylla</i>	<i>E. grandis</i>
1	BA (1) y ANA (1)	3.45 b	2.04 b
2	BA (1) y ANA (0)	1.65 b	1.21 b
3	BA (1) y ANA (3)	2.89 b	1.74 b
4	BA (0) y ANA (1)	0.32 c	0.62 c
5	BA (0) y ANA (0)	0.17 c	0.46 c
6	BA (0) y ANA (3)	0.67 c	0.69 c
7	BA (3) y ANA(1)	6.98 a	4.88 a
8	BA (3) y ANA (0)	8.44 a	5.73 a
9	BA (3) y ANA (3)	5.31 a	3.18 a

Valores con la misma letra en sentido vertical son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Número de raíces *E. urophylla* (clon-141) y *E. grandis* (clon-246)

Los explantes establecidos y transferidos a los medios de cultivo desarrollaron raíces cuyos resultados aparecen en el Cuadro 6. Se puede observar que los mejores resultados para *E. urophylla* y *E. grandis* fueron los tratamientos 7, 8 y 9 donde se obtuvieron un buen número de raíces gruesas y no quebradizas (Figura 1a y 1b).

Cuadro 6. Número de raíces *E. urophylla* (clon-141) y *E. grandis* (clon-246).

Número de tratamiento	Hormonas mg/L	Raíces/explante (medias)	
		<i>E. urophylla</i>	<i>E. grandis</i>
1	BA (1) y ANA (1)	1.45 b	2.21 b
2	BA (1) y ANA (0)	1.55 b	1.31 b
3	BA (1) y ANA (3)	2.89 b	1.24 b
4	BA (0) y ANA (1)	0.26 c	0.72 c
5	BA (0) y ANA (0)	0.17 c	0.46 c
6	BA (0) y ANA (3)	0.67 c	0.69 c
7	BA (3) y ANA(1)	4.98 a	4.88 a
8	BA (3) y ANA (0)	5.43 a	4.73 a
9	BA (3) y ANA (3)	4.31 a	3.18 a

Valores con la misma letra en sentido vertical son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Figura 1. Enraizamiento *in vitro* de a) *E. urophylla* y b) *E. grandis*.

Aclimatación

Las plantas vigorosas y que medían aproximadamente 20 cm. de longitud se consideraron como establecidas y listas para ser llevadas a plantación, lo que ocurre aproximadamente a los 2 meses de iniciado el proceso de adaptación. Las plantas pueden mantenerse hasta 3 meses en las bolsas, si por alguna causa no pueden ser llevadas antes a plantar en lugar definitivo. Los porcentajes de sobrevivencia alcanzados para las dos especies de eucaliptos se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Porcentajes de sobrevivencia logrados para las dos especies de Eucaliptos

Especie	Porcentaje de sobrevivencia
<i>E. grandis</i>	75
<i>E. urophylla</i>	85

Durante el periodo de establecimiento aséptico en incubación se registraron altos niveles de contaminación en los tratamientos ensayados para lograr la primera etapa, lo que resultó en elevadas pérdidas en el número de explantes.

Los principales causantes de la contaminación fueron identificados como hongos de la clase Deuteromicetos como *Penicillium spp*, además de otras especies fungosas asexuales como *Dichotomhthora* y *Cercospora*. En relación con la contaminación, Alvarado (1998), plantea que la superficie de los tejidos de las plantas constituyen un hábitat para los microorganismos, los que se pueden alojar en estomas, lenticelas o cualquier abertura natural, dificultando su eliminación.

En *Eucalyptus* y en general en los árboles perennifolios se hace difícil la desinfección, pues los ápices meristemáticos no están cubiertos, es decir, presentan yemas desnudas, sin pérulas protectoras como las de los árboles decíduos latifoliados de regiones templadas y frías.

Major y Krause (1995), durante el establecimiento *in vitro* de brotes epicórmicos de *E. grandis* obtuvieron un 11% de oxidación de los tejidos de los explantes. Además Castro (1998) en la propagación *in vitro* de árboles élites de *E. camaldulensis* y *E. tereticornis*

reportó un 10% de pérdidas por oxidación, en este trabajo se obtuvieron valores de 5% y 9% de oxidación para *E. urophylla* y *E. grandis*, respectivamente. Estos valores se consideran bajos, pues la oxidación puede en ocasiones constituir un serio problema en el establecimiento y sobrevivencia de explantes. Este fenómeno es más agudo en las especies leñosas y es reportado en una amplia gama de vegetales.

Durand *et al.* (1991), plantearon que para reducir la fenolización en *Eucalyptus*, es necesario incubar los tejidos en la obscuridad, lo que no favorece la síntesis de fenoles que ocasionan oxidación. Muhitch y Fleycher, (1985) sostienen que el control de las oxidaciones puede lograrse mediante pretratamientos de inmersión de los explantes en soluciones conteniendo antioxidantes, la reducción en la concentración de sales en el medio, el cultivo de explantes provenientes de las zonas en estado de crecimiento activo y realización adecuada de subcultivos frecuentes. Por lo que el enjuague con solución de antioxidantes, así como la adición de los mismos al medio de cultivo, como la L-cisteína (inhibidora de la polifenoloxidasas) y el carbón activado (absorbente de fenoles) — como se demuestra en esta investigación — previenen la oxidación de los tejidos. Aunado a esto, con la exposición del explante a la terramicina (40 mg/100 ml) se obtuvo hasta 42 % de desinfestación de explantes.

A los 45 días de sembrados los explantes en el medio Gamborg (1991) se incrementó el desarrollo de callo organogénico, observándose callos y formaciones globulares que son centros generativos de cadenas clonales proliferativas de alto potencial (Aloísio, 1997). La citocinina (BA) estimula la división celular y activa los puntos de crecimiento de los nuevos brotes (Castro, 1998). En el medio suplementado con BA se logró la máxima respuesta y los explantes formaron callos en su base, estos resultados concuerdan con Azmi *et al.* (1997) que trabajaron con *E. globulus*.

Los explantes que no brotaron se perdieron debido a la hipertrofia de las axilas de las hojas, que se fragmentaron en dos partes, formando un callo blanquecino disgregable. Resultados similares fueron observados por Aloísio (1997), en secciones de tallos y frutos de *Melia azadirach*, cultivadas *in vitro*, de acuerdo con el autor, esta deformación se debe a una hipertrofia lenticelar, que puede ser inducida por la presencia de reguladores del crecimiento o por la concentración de etileno en condiciones *in vitro*.

Los resultados de la presente investigación muestran organogénesis directa (formación diferenciada de brotes), inducida al colocar yemas axilares de *E. urophylla* (clon-141) y *E. grandis* (clon-246) en un medio básico Gamborg B5 (Gamborg, 1991) suplementados con BA (3.0 mgL^{-1}) y ANA (1.0 y 3.0 mgL^{-1}). En los trabajos realizados por Prabha *et al.* (1999) en especies del género *Eucalyptus* manifestaron resultados parciales tanto en el cultivo de células y cultivo de órganos, reportándose formación de callo y embriones utilizando preferentemente semilla y estructuras florales (anteras).

Los resultados obtenidos muestran en forma general una mayor respuesta de multiplicación de brotes y raíces en los tratamientos donde se utilizó BA. Comportamiento similares han sido reportados por Castro (1998) en *E. citriodora* y Durand *et al.*, (1991) en *E. camaldulensis*, aunque con menores concentraciones de BA (0.5 mgL^{-1}) a las utilizadas en esta investigación.

La sobrevivencia de las plantas *in vitro*, regeneradas durante el período de adaptación, depende fundamentalmente de las peculiaridades fisiológicas, estructurales y anatómicas que las plántulas presentan producto del desarrollo *in vitro*, el que permite una elevada humedad relativa en el interior de los frascos, baja intensidad luminosa, bajo intercambio gaseoso, abundante disponibilidad de nutrientes y carbono (generalmente en forma de sacarosa) y una pequeña variación de temperatura en un rango considerado óptimo para el cultivo (Preece y Sutter, 1991; Teixeira *et al.*, 1995).

Entre los principales problemas que presentan las plantas *in vitro* se encuentran: ineficiencia fotosintética debido a los bajos contenidos de pigmentos del aparato fotosintético y el desarrollo de cloroplastos con granas desorganizadas (Inoue *et al.*, 1990; Preece y Sutter, 1991); capacidad reducida de formar cutículas cerosas (Amar *et al.*, 1995), estomas poco funcionales debido a la alteración en la forma de las células oclusivas (Ziv, 1991); ineficiencia de los tejidos de sustento debido a la reducida presencia de colénquima y esclerénquima (Preece y Sutter, 1991); absorción y transporte de agua ineficiente debido a una conexión vascular incompleta o deficiente entre la raíz y el brote. Durante las primeras dos semanas después del trasplante, es necesario controlar adecuadamente los factores ambientales y prácticamente se requiere simular es este período las condiciones del ambiente *in vitro* hasta que las plantas se adapten a las nuevas condiciones. Para evitar el exceso de transpiración de las jóvenes

plantas, hasta que éstas logren un adecuado desarrollo de los estomas y la cutícula, es necesario mantener una alta humedad relativa (Ziv, 1991). El control de la intensidad de la luz en esta fase, es también importante ya que las plantas provienen de un ambiente con intensidad baja y son expuestas a uno con alta intensidad, por lo tanto ésta se debe regular para evitar la fotoinhibición del aparato fotosintético. Para atenuar el efecto de la luz durante las dos primeras semanas, se emplean mallas plásticas de diferentes porcentajes de sombra, generalmente entre 30-70 % dependiendo de las necesidades del cultivo (Agramonte *et al.*, 1998). Trindade y Pais (1997), lograron entre un 90 y un 95 % de sobrevivencia de *plantas in vitro* de *E. globulus* en la fase de aclimatación.

Por su parte Gill (1996), enraizó plántulas de *E. tereticornis* en medio líquido y en medio sólido obteniendo un 82 % de adaptación de las que provenían del medio líquido y un 38.5 % de las que provenían del medio sólido. De acuerdo con lo obtenido por los autores anteriormente citados, los porcentajes de sobrevivencia alcanzados en este trabajo para las dos especies de eucalyptus son aceptables.

CONCLUSIONES

Para la obtención de cultivo aséptico en la propagación de eucaliptos (*E. urophylla* clon-141 y *E. grandis* clon-246), los mejores tratamientos de desinfección son las combinaciones de los factores que llevan fungicida sistémico (cuprimicin 150 mg /100ml) y antibiótico (terramicina 40 mg /100ml), en el cual se deben exponer a los explantes de eucalipto durante 10 y 30 minutos, donde se obtuvo más del 80% de desinfección del total de explantes sembrados.

Además, de acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que el medio Gamborg B5 complementado con BA y ANA es un excelente medio para el cultivo *in vitro* de *E. urophylla* clon-141 y *E. grandis* clon-246, puesto que induce a la formación de callo en la base del tallo y de multiplicación de brotes y raíces en las dos especies del eucalipto experimentadas manteniendo respuestas positivas para el desarrollo de estructuras embriogénicas *in vitro*. Se logró la aclimatación de las plantas *in vitro* de *E. grandis* y *E. urophylla*, donde se alcanzan porcentajes de sobrevivencia aceptables de entre 75 y 85 %, respectivamente.

LITERATURA CITADA

Agramonte D., F. Jiménez y M. A. Dita

- 1998 **“Aclimatización en Propagación y Mejora Genética de Plantas por Biotecnología”**. Pérez Ponce, J. N. (Ed), Instituto de Biotecnología de las Plantas, Santa Clara, Cuba, 400 pp.

Ahuja, M.

- 1993 **“Micropropagation of woody plants”**. Kluwer Acad. Publ. 356 pp.

Aloísio, X.

- 1997 **“Enraizamiento *in vitro* de gemas de *Eucalyptus* multiplicads e alongados”**. Scientia Forestalis. 51: 29-26.

Alvarado, C. Y.

- 1998 **“Contaminación microbiana en el cultivo de plantas”**. In: Pérez Ponce, J. N. (de) propagación y mejora genética de plantas por biotecnología de las plantas. Santa Clara, Cuba. p.102-108.

Amar S, L.E.P. Pérez y G. B. Kerbaux

- 1995 **“Análisis comparativo del contenido de ceras en hojas de *Catasetum fimbriatum* (Morres Lindl) "in vitro" y "ex vitro"”**. En Congreso Nacional de Botánica, 44. Anais Ribeirao Preto. p. 267 - 268.

Azmi A., M. Noin, M. Landré, Proudhet M., and Chriqui D.

- 1997 **“High frequency of plant regeneration from *Eucalyptus globulus* Labill. Hypocotyles: ontogenesis and plody level of the regenerants”**. Plant Cell, Tissue and Organ Culture 51: 9-16.

Bon M. y Monteuiis O.

- 1996 **“Biotechnologies forestieres on Sabah”**. Bios et Forets des Tropiques 248: 32-42.

Castro, R. D.

- 1998 **“Propagación *in vitro* de árboles élités adultos de *Eucalyptus camaldulensis* y *E. tereticornis*”**. III Encuentro Latinoamericano de Biotecnología vegetal. REDBIO'98. Resúmenes. FAO-CUBA. P.28-29 .

Ceneno, J. C.

1997 **"The management of Teak plantations"**. Tropical Forest update 7(2):1-5.

Daquinta G. M., L. Ramos, y Lezcano, R. Rodríguez y M. Escalona

2000 **"Algunos elementos en la micropropagación de la Teca"**. Biotecnología Vegetal. 1: 39-44.

Diallo N. Y E. Duhoux

1984 **"Organogenesis et multiplication in vitro chez l'Eucalyptus camaldulensis"**. J. Plant Physiol. 115: 177-182.

Durand C., R. Boulay y A. Franclet

1991 **"Vegetative propagation of Eucalyptus"**. In: Tissue Culture in Forestry. Bona J. M. y D.J. Durzan (Eds): The Hague Nijhoff. p. 150-181.

FAO

1994 **"El Eucalipto en la Población Forestal"**. Colección FAO: Montes, No. 11, Roma, Italia. 524 pp.

Gamborg, O.

1991 **"Plant tissue culture"**. In: Tissue Culture for crops. Project. Physiol Department, Colorado State University, Fort Collins, CO U.S.A. p. 1-24.

Gill R.S.I.

1996 **"Micropropagation of economically important tropical forest trees"**. Tree improvement for sustainable tropical forestry. QRFI-IUFRO Conference, Caloundra, Queensland, Australia. Vol. 1:230-233.

González A. N. Vera, M. Pérez y E. Rodríguez

1987 **"Obtención de posturas de *Eucalyptus saligna* Sm. en topes de collantes mediante el empleo de estaquillas"**. Centro Agrícola. XIV (1): 77 - 84.

Harney, V. J.

1995 **"Vegetative propagation of the eucalyptus"**. Aust. For. Res. 10:191-211.

Inoue, M. T., J. D. Vieira y G. Correa

- 1999 **“Estudio comparativo del desempeño fotosintético entre posturas micropropagadas y de estacas de cuatro clones del híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*”**. In: Congreso Forestal Brasileiro, 6. Campos de Jordao. Anais. P.493 - 496.

Major G. y M. Krause

- 1995 **“Micropropagación de árboles adultos de *Eucalyptus pellita*”**. Revista Uruguaya Forestal 18:16-20.

McComb, J. A.

- 1994 **“Clonal propagation of eucalyptus”**. In: Lindsey K. (ed) Plant Tissue Culture. Kluwer, Dordrecht. The Netherlands. p. 322-328.

McCombo J. A. y I. J. Bennett

- 1996 **“*Eucalyptus (Eucalyptus sp.)*”** In: Bajaj YPS (ed) Biotechnology in Agriculture and Forestry, Vol. 1. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg. p. 340-362.

Medero V., E. Rodríguez, R. Gómez, M. García, J. López, J. Ventura, M. Martínez, M. Álvarez

- 1997 **“Regeneración por embriogénesis somática en clones cubanos”**. Agrotécnia de Cuba 27(1): 92-96.

Mehra, P.

- 1982 **“Clonal propagation of *Eucalyptus* by tissue culture”**. Plant Sci. 26: 1-11.

Monteuuis, O.

- 1994 **“Recent advances in mass clonal propagation of Teak”**. Proceeding Workshop Biorefor, Kangar, Malasia p. 117-212.

Monteuuis O., M. Bon y D. Goh

- 1998 **“Teak propagation by *in vitro* culture”**. Bois et forets des tropiques. 226(2): 1-11.

Muhitch M. y J. Fleycher

- 1985 **“Influence of culture age and spermidine-treatment on the acumulation of phenolic compounds in suspension cultures”**. Plant Physiol. 78:25-28.

Muralidharan E. y A. Mascareñas

- 1987 **“In vitro plantlet formation by organogenesis in *Eucalyptus camaldulensis* and by somatic embryogenesis”**. In: E. citriodora. Plant Cell Rep. 6: 256-259.

Prabha B., V. Sharma, J. Ila, L. Kopoor.

- 1999 **“Micropropagation of Newly produced F1 hybrid of *eucalyptus* (*E. tereticornis* x *E. camaldulensis*)”**. Silvae Genetica. 48:20-28.

Preece J. E. and E. G. Sutter

- 1991 **“Acclimatization of micropropagated plant to the greenhouse and field”**. In: Debergh, P.C., Zimmerman, R.H. Micropropagation technology and application. (Ed.) Dordrech Kluwer Academic Press. p. 71 - 93.

SAS Institute Inc.

- 1992 **“SAS User’s Guide: Statistics, Statistical versión 6”**. Cary, North Carolina, U.S.A. 95 pp.

Subbaiah M. y S. Minocha

- 1990 **“Shoot regeneration from stem and leaf callus of *Eucalyptus tereticornis*”**. Plant Cell Rep. 9: 370-373.

Teixeira J. B., J. I. Lemos y M. C. Coelhe

- 1995 **“Micropropagação de espécies leñosas da mata atlântica”**. In: Congreso brasileiro de Fisiología Vegetal, 5. (Ed.) Lavras. Anais. p. 132.

Teulières C. y A. Boudet

- 1992 **“Obtention et explication de systèmes simplifiés (cellules protoplastes) chez le genre *Eucalyptus* en vue de l’étude et de l’amélioration de la résistances au froid”**. AFOCEL 1991. “Biotechnologies appliquées aux arbres forestiers”, Paris, p. 127-156.

Trindade H. and M. S. Pais.

- 1997 **“In vitro studies on *Eucalyptus globulus* rooting ability”**. "In Vitro" Cellular and Developmental Biology Plant. 33:1, 1 - 5.

Ziv, M.

- 1991 **“Vitrification: morphological and physiological disorders of "in vitro" plant”**.
In: Debergh, P.C., Zimmerman, R.H. 1991. Micropropagation : Technology and application. (Ed.) Dordrecht, Kluwer Academic. p. 49 - 69.

Ra Ximhai

Revista de Sociedad, Cultura y
Desarrollo Sustentable

Ra Ximhai

Universidad Autónoma Indígena de México

raximhai@uaim.edu.mx

ISSN: 1665-0441

México

2005

MORFOLOGÍA DE ACÍCULAS Y CONOS EN POBLACIONES NATURALES

DE *Pinus arizonica* Engelm.

Rodrigo Rodríguez Laguna; Miguel A. Capo Arteaga

Ra Ximhai, enero-abril, año/Vol.1, Número 1

Universidad Autónoma Indígena de México

Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa

pp. 131-152

MORFOLOGÍA DE ACÍCULAS Y CONOS EN POBLACIONES NATURALES DE *Pinus arizonica* Engelm.

MORPHOLOGY OF NEEDLES AND CONES IN NATURAL POPULATIONS OF *Pinus* *arizonica* Engelm.

Rodrigo Rodríguez-Laguna¹; Miguel A. Capo-Arteaga²

¹ Profesor Investigador, Centro de Investigaciones Forestales, ICAP. UAEH. Tulancingo, Hidalgo. ² Profesor Investigador, Departamento Forestal. UAAAN. Saltillo, Coah.

RESUMEN

Con la finalidad de estimar y mostrar la variación fenotípica de algunas poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engelm se evaluaron 11 variables morfológicas en acículas y conos de nueve poblaciones naturales, considerando como la fuente de variación sólo la población. De las variables analizadas en el presente estudio como, el largo de acículas, el número de serraciones por centímetro, el número de acículas por fascículo y el ancho de acículas, presentaron la mayor variación entre poblaciones, en tanto que la variable con menos variación entre poblaciones se presentó en el largo de cono y el largo de umbo. De acuerdo con el análisis de varianza, los seis caracteres de acículas evaluados resultaron altamente significativos, mientras que de los cinco caracteres de conos evaluados, tres de ellos fueron significativos y dos fueron no significativos. Se presentaron correlaciones altamente significativas en la mayoría de las variables analizadas entre las que destacan: 1) número de serraciones por cm con el número de estomas por cm en las tres caras de la acícula, 2) el número de acículas por fascículo con la altitud y 3) el largo de la acícula con el ancho de las mismas. El análisis de conglomerados formó cuatro grupos, a dos terceras partes de la máxima distancia euclidiana, los cuales son morfológicamente diferentes entre sí, existiendo una tendencia a agrupar las poblaciones por factores climáticos y de origen fisiográfico.

Palabras clave: *Pinus arizonica* Engelm., variación morfológica, variación geográfica, morfología.

SUMMARY

With the purpose of considering and showing the phenotypic variation of some natural populations of *Pinus arizonica* Engelm, there were evaluated 11 morphologic variables in needles and cones of nine natural populations considering the population as the only variation source. From all the variables analyzed in the present study the length of needles, the number of needles by centimeter, the number of needles by fascicle and the width of needles, were the ones who displayed the greatest variation between populations, whereas the variables with less variation between populations were the length of cone and the length of umbo. According to the variance analysis, the six evaluated characters of needle were highly significant, whereas from the five characters of evaluated cones, three of them were significant and two were not significant. Highly and significant correlations were presented in most of the analyzed variables outstanding: 1) the number of needles by cm with the number of stomas by cm in the three faces of needle, 2) the number of needles by fascicle with the altitude and 3) the length of the needle with the width of the same ones. The analysis of conglomerates formed four groups, in two thirds of the maximum Euclidian distances, which are morphologically different between each other, existing a trend to classify the populations by climatic factors and of physiographic origin.

Key words: *Pinus arizonica* Engelm., morphologic variation, geographic variation, morphology.

INTRODUCCIÓN

El ambiente del lugar ejerce presiones sobre el organismo y su genotipo; como respuesta a esto pueden ser acentuados determinados rasgos o más específicamente, determinadas combinaciones genéticas son perpetuadas con mayor frecuencia en una población con un ambiente determinado, originando la predominancia de un fenotipo particular. Aunque una variación estacional se produce por una combinación de factores ambientales (primordialmente la longitud o duración del día (fotoperíodo) y la temperatura) que actúan a lo largo de cierto período de tiempo. Semejantes variaciones fenotípicas estacionales son a veces de suficiente magnitud como para que una misma especie llegue a recibir dos nombres, al describirse como especies diferentes lo que no son más que diversas formas estacionales (Bell, 1968).

Sin embargo, la variación geográfica puede ser definida como variación fenotípica asociada con la localidad, una amplia área de distribución de la especie implica invariablemente diferencias en una o más características de una parte a otra de su área. Las diferencias, entre ellos son fenotípicas; así puede deberse a factores genéticos, factores ambientales o interacciones entre ellos. Los árboles forestales son fenotípicamente altamente variables (Schoenike, 1976).

Desafortunadamente el *Pinus arizonica* Engelm. ha sido poco estudiado y existen confusiones en cuanto a su clasificación taxonómica y distribución. Sin embargo, es una especie de gran importancia económica, su madera se usa principalmente en la industria de aserrío, para durmientes, postes para teléfono, entre otros.

Existe una variación que es originada por los diferentes ambientes donde crecen los individuos, por lo que los factores ambientales modifican drásticamente la variabilidad en plantas, especialmente en el crecimiento. Por otro lado, las características cualitativas en árboles forestales tienden a ser más heredables y menos influenciadas por el ambiente. También la variación es originada por diferencias genéticas entre las especies, generalmente de mayor grado y originada por la mutación, recombinación genética, migración, deriva genética y selección natural (Zobel y Talbert, 1988).

El conocimiento de la variación dentro de una especie es básico para definir los objetivos de un programa de mejoramiento de árboles. Si la variación encontrada es mínima, se deben utilizar preferentemente técnicas silvícolas en lugar de método genético (Yañez, 1981). De tal modo que en este estudio se planteó evaluar las diferencias que se presentan entre poblaciones con respecto a algunas características morfológicas de *Pinus arizonica* Engelm., determinar las relaciones existentes entre las características morfológicas y las condiciones ambientales de las poblaciones naturales, así como agrupar las poblaciones por afinidad y separarlas por diferencias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de muestras en campo

El material vegetativo se obtuvo en nueve poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engelm. (Cuadro 1). En ellas se realizó un recorrido antes de seleccionar los árboles. En cada población se seleccionaron diez árboles con un distanciamiento mínimo entre árbol de 50 metros para disminuir el grado de parentesco entre árboles colectados. Se seleccionaron árboles con características favorables como dominantes, bien conformados, libres de plagas y que al momento de la colecta presentaran conos. Cada árbol se identificó con números progresivos. Las muestras fueron etiquetadas y separadas individualmente. En el campo a cada árbol se le registró altura, diámetro y color de corteza.

Una vez seleccionado el árbol se dividió imaginariamente la copa en cuatro secciones, de las cuales se tomó una muestra de conos y acículas de cada sección de la copa que se mantuvieron separadas para el registro de los datos, de modo que se colectaron cuatro muestras por árbol.

Cuadro 1. Características de nueve poblaciones naturales evaluadas de *P. arizonica* Engelm.

Núm.	Localidad	Latitud norte	Longitud oeste	Altitud (msnm)	pp. (mm.)	Temp. °c	Roca	Clima
1	Chapultepec, Saltillo.	25° 14'	100° 53'	2350	500- 600	14-16	Q(s)	BWhw''(e)
2	San Marcos Cuatro- ciénagas	26° 41'	102° 02'	1700	400- 500	16-18	Q(s)	BSoh(x'')(e)
3	Entronque a Galeana.	24° 46'	100° 02'	1600	600- 700	14-16	Q(s)	BSoh(h'')hw''(e)
4	Los Lirios, Arteaga.	25° 22'	100° 34'	2800	600- 700	12-14	Q(s)	BS1kw''(e)
5	S. La Casita Parras.	25° 12'	101° 26'	2300	500- 600	14-16	Q(s)	BSohw''(e)
6	S. Encantada Ocampo.	28° 25'	102° 32'	1900	500- 600	16-18	Q(s)	BSokw(e)
7	S. Antonio O. Arteaga.	25° 28'	100° 33'	2400	500- 600	14-16	Q(s)	BSohw''(e)
8	Carbonera, Arteaga.	25° 27'	100° 34'	2600	600- 700	14-16	Q(s)	BS1kw''(e)
9	Guanacevi, Durango.	25° 54'	106° 11'	2960	600- 700	12-14	Q(s)	BS1kw''(e)

Datos obtenidos del Atlas Nacional del Medio Físico, SPP. 1981a, 1981b, 1981c, y CETENAL 1975a, 1975b, 1975c. Pp. (mm.)= Precipitación mínima y máxima anual en milímetros. Temp. °C = Temperatura mínima y máxima anual en grados centígrados.

Medición de las variables en acículas

1. Número de acículas por fascículo; se contaron directamente en dos fascículos que fueron tomados al azar, obteniendo un promedio de cada rama.
2. Largo de las acículas: (LAR) la lectura se tomó con una regla marcada en el Sistema Métrico Decimal (S.M.D.) obteniendo una media, de las mismas acículas que fueron contadas, verificando que estuvieran completas.
3. Ancho de las acículas: (AN) la lectura se repitió dos veces obteniendo el promedio con un vernier marcado en el S.M.D. se realizó a 3 ó 4 cm a partir de la vaina.
4. Largo de la vaina: (VALA) las lecturas fueron hechas en las vainas del año anterior, usando un vernier y registrando las lecturas en milímetros.
5. Número de estomas por cm en las tres caras de la acícula: (NEST) utilizando un microscopio simple y un vernier se registraron las lecturas aproximadamente en la parte media de la acícula realizando dos repeticiones para obtener el promedio.
6. Número de serraciones por cm en la acícula: (NSER) las lecturas se realizaron aproximadamente a la mitad de la acícula, utilizando un microscopio simple y un vernier, se obtuvo el promedio de dos repeticiones hechas.

Medición de las variables en conos

1. Número de conos por verticilo: (NCON) se registró el número de señales de pedúnculos y conos que se encontraron en los verticilos de las ramillas.
2. Largo del cono: (LACO) el tamaño del cono se registró en forma abierta ya que fueron del año anterior. Se obtuvo un cono al azar en el caso de que hubiera más de uno, registrando las lecturas en centímetros y usando un vernier.

3. Ancho del cono: (ANCO) la lectura se realizó de la parte más amplia del cono con un vernier obteniendo el promedio de dos repeticiones y registrando el valor en centímetros.
4. Largo de umbo: (LARUM) la escama se obtuvo al azar a dos cm aproximadamente de la base del cono, la lectura se realizó con un vernier en milímetros.
5. Ancho del umbo: (ANCHU) se utilizó la misma escama a la que se le midió el largo de umbo, en las que se determinaron las lecturas en mm con vernier.

Análisis de la información.

El análisis estadístico de los datos se realizó con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System, 1985) Versión 6. Por medio de este paquete se realizó un análisis de varianza, además se realizó una prueba Tukey para agrupar las poblaciones semejantes, también se hizo un análisis de correlación entre variables fisiográficas, climáticas del sitio con las variables morfológicas del arbolado, por último se realizó un análisis de agrupamiento o dendrograma.

El análisis de varianza se obtuvo considerando el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + P_i + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = observación en la *j-ésima* variable morfológica de la *i-ésima* población.

μ = efecto de la media poblacional.

P_i = efecto de la *i-ésima* población.

E_{ij} = efecto del error aleatorio de la *j-ésima* observación en la *i-ésima* población.

$i = 1, 2, 3, \dots, 9$. número de población.

$j = 1, 2, 3, \dots, 40$. número de árbol por población

Análisis de correlación.

El análisis de correlación entre las variables morfológicas se realizó considerando únicamente los valores promedio por árbol, para estas mismas variables con las

variables climáticas, se obtuvo una media por población de cada una de las variables evaluadas. Estos valores promedio de las características morfológicas se compararon con los datos geográficos y climáticos de las poblaciones. Con este procedimiento se obtuvieron los coeficientes de correlación, que son una medida de la mutua relación entre dos variables (Snedecor, 1970) con una probabilidad de cada correlación en porcentaje de significancia.

Análisis de conglomerados.

Este análisis de conglomerados se realizó con el fin de conocer el grado de similitud entre las poblaciones colectadas. La agrupación que se obtiene corresponde a un ordenamiento por semejanzas y diferencias entre las poblaciones, el cual se representa con un dendrograma de agrupamiento que considera a las variables morfológicas evaluadas, correlacionadas entre sí. Para el análisis de agrupamiento se utilizó el procedimiento CLUSTER opción STD y método A (SAS, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de las acículas de *Pinus arizonica* Engelm.

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de análisis de varianza de las variables de acículas consideradas en el estudio. Para las variables Número de acículas por fascículo (HOJ), Largo de la acícula (LAR), Ancho de la acícula (AN), Largo de la vaina (VALA), Número de estomas por cm en las tres caras de la acícula (NEST), Número de serraciones por cm en la acícula (NSER), se encontraron diferencias altamente significativas.

Al hacer la prueba Tukey para la variable número de acículas por fascículo (HOJ) con las nueve poblaciones se forman cuatro grupos que se representan en el Cuadro 3, el grupo A se formó con las poblaciones 9 y 4 (Guanaceví y Los Lirios) en estas poblaciones se encontró mayor número promedio de acículas por fascículo mientras que en la población 3 (Entronque a Galeana) se encontró el menor número de acículas promedio por fascículo que en el resto de las poblaciones. El número de acículas promedio por fascículo encontradas en las poblaciones colectadas están dentro del rango

que se reporta para el *P. arizonica* que son tres acículas por fascículo, raramente cuatro o cinco (Martínez, 1948).

Cuadro 2. Valores del análisis de varianza de seis caracteres de acículas de *Pinus arizonica* Engelm.

VARIABLE		FV	GL	CM
No. de acículas	(HOJ)	Procedencia	8	3.673**
Largo acículas	(LAR)	Procedencia	8	110.239**
Ancho acículas	(AN)	Procedencia	8	0.108**
Largo de vaina	(VALA)	Procedencia	8	10.851**
No. estomas cm	(NEST)	Procedencia	8	4045.754**
No. serraciones cm	(NSER)	Procedencia	8	3.285**

FV=Fuente de variación; GL=Grados de Libertad; CM=Cuadrados Medios esperados.

**=Altamente significativo

Para el largo de la acícula (LAR) se encontraron valores promedio que van de los 24.81 cm a 13.16 cm al hacer la prueba Tukey para esta variable se encontró que se forman cuatro grupos que se presentan en el Cuadro 3. En las población 3 (Entronque a Galeana) se encontraron los árboles con acículas más grandes mientras que en la población 9 (Guanaceví) se encontraron las longitudes menores. El largo de la acícula encontrado en estas poblaciones es mayor que el reportado por Martínez (1948), que es de 12.5 a 17.5 cm de longitud con excepción de la población 9 (Guanaceví) la cual presenta valores dentro del rango mencionado. Es posible que estos resultados no correspondan con los que menciona Martínez (1948) debido a que los datos que reporta dicho autor, los obtuvo de otras poblaciones que se encuentran en la Sierra Madre Occidental, sin coleccionar material de la Sierra Madre Oriental, área donde se presentan las otras poblaciones en estudio.

Cuadro 3. Resumen de los valores obtenidos de la prueba de Tukey para las variables de acículas en *Pinus arizonica* Engelm.

PROCEDENCIA	NHOJ (#)	LAR	AN (mm)	VALA (mm)	NEST (#)	NSER (#)
(#)		(cm)				
1	3.3 CD	19.4 C	1.4AB	12.9 D	124.6AB	4.4 B
2	3.6 BCD	22.5ABC	1.3 B	14.7ABC	105.7BC	4.1 BCD
3	3.1 D	24.8A	1.5A	14.0BCD	152.1A	5.5A
4	4.2AB	20.7 BC	1.3 B	15.7 ^a	98.3 BC	4.2 BC
5	3.1 D	20.7 BC	1.5AB	14.9AB	117.4BC	4.3 B
6	3.5 BCD	23.3AB	1.4 B	13.2 CD	90.4 C	3.6 CD
7	4.1 B	22.2ABC	1.3 B	14.8ABC	93.1 C	3.6 D
8	4.1 BC	21.4 BC	1.4 B	14.6ABC	95.3 C	3.9 BCD
9	4.95A	13.1 D	1.1 C	12.7 D	96.5 C	4.1 BCD

NHOJ=Número de hojas por fascículo; LAR=Largo de la acícula; AN=Ancho de la acícula; VALA=Largo de la vaina; NEST=Número de estomas por cm en las tres caras de la acícula; NSER=Número de serraciones por cm.

1=Chapultepec, Saltillo, Coah.

2=Sierra San Marcos, Cuatrociénegas, Coah.

3=Entronque a Galeana, Galeana, Nuevo León.

4=Los Lirios, Arteaga, Coah.

5=S. La Casita, Parras, Coah.

6=S. La Encantada, Ocampo, Coah.

7=S. Antonio de la Osamenta, Arteaga, Coah.

8=La Carbonera, Arteaga, Coah.

9=Guanaceví, Guanaceví, Dgo.

NOTA: Letras iguales en la prueba Tukey son estadísticamente iguales.

En la variable ancho de la acícula (AN) las poblaciones con valores más grandes son la población 3 (Entronque a Galeana) y las poblaciones 5 y 1 (Sierra La Casita y Chapultepec) con la media mayor en el mismo grupo A. En este caso una vez más la población 9 (Guanaceví) tiene la media menor, habiendo una diferencia de la media mayor con la media menor de 0.38 mm se puede observar que la población 3 (Entronque a Galeana) tiene menor número de acículas por fascículo pero acículas más largas, lo que ocasiona acículas más anchas debido a los factores ambientales que quedan representados fenotípicamente en el árbol.

Para la variable longitud de la vaina (VALA) se encontraron valores de 15.73 mm que es el promedio mayor que corresponde a las poblaciones 4 (Los Lirios), en el mismo

grupo A se encuentran las poblaciones 5 (Sierra La Casita) y 7 (Antonio de la Osamenta), mientras que la población con el menor promedio es la población 9 (Guanaceví) donde se encontraron valores promedio de 12.72 mm de longitud de la vaina. Los valores obtenidos en el presente estudio comparados con los valores que muestra Martínez (1948) y Perry (1991) son muy similares, claro está que no son las mismas poblaciones donde se tomaron los datos, esta variable se asocia a la longitud de la acícula y número de acículas por fascículo porque en la población 9 (Guanaceví) otra vez resultaron los valores menores de dicha variable.

Para el número de estomas por cm en las tres caras de la acícula (NEST) se encontraron valores promedio que van de los 152.15 a 90.45 estomas por cm en las tres caras de la acícula al hacer la prueba Tukey para esta variable se encontró que se forman tres grupos. El grupo A, lo forman las poblaciones 3 (Entronque a Galeana) y 1 (Chapultepec) que tienen los promedios más altos, mientras que la población 6 (Sierra La Encantada) tiene el menor número de estomas por cm en las tres caras de la acícula junto con la población 7 (San Antonio de la Osamenta) que forman el grupo C. Esto es muy posible que se deba a la exposición en que se encuentran los árboles muestreados, ya que la población 3 (Entronque a Galeana) se encuentra en un valle plano que forma un rodal poco disperso, sin embargo la diferencia puede estar en que la población 6 (Sierra La Encantada) se encuentra en ladera con poca pendiente a la exposición Sur y forma un rodal disperso, además tiene menos precipitación media anual.

Para la variable número de serraciones por cm en la acícula (NSER), la población 3 (Entronque a Galeana) forma un sólo grupo A con una media de 5.55 serraciones por cm, que es la media más alta. El grupo D lo forman las poblaciones 2 (Sierra San Marcos), 9 (Guanaceví), 8 (Cañón La Carbonera), 6 (Sierra La encantada), y 7 (Antonio de la Osamenta) que resultaron con los valores menores en las medias respectivamente. Por los resultados que reporta Martínez (1948) se confirma que tienen parecido en el número de serraciones por cm con los valores promedio. Esta variable se asocia con el número de estomas por cm en la acícula ya que las mismas poblaciones resultaron diferentes en las dos variables, también influyen las variables largo de acícula y ancho de acícula que forman una acícula más grande, lo que provoca tener mayor número de serraciones por cm, en tanto que las condiciones climáticas también ejercen su presión

ya que difieren para estas dos poblaciones, estas variables tienen un valor taxonómico porque separamos grupos de poblaciones con variables evaluadas parecidas.

Características de conos de *Pinus arizonica* Engelm.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados del análisis de varianza para las características de conos en *P. arizonica*. En el número de conos por verticilo (NCON), ancho de conos (ANCO) y ancho del umbo (ANCHU) se encontraron diferencias altamente significativas. En el largo de conos (LACO) hubo diferencias significativas mientras que en largo del umbo (LARUM) no se encontraron diferencias significativas.

En el número de conos por verticilo (NCON) se encontraron valores promedio que van de los 2.32 a 1.20 conos por verticilo, al hacer la prueba Tukey para esta variable se encontró que se forman dos grupos (Cuadro 5). La población 5 (Sierra La Casita) pertenece al grupo A, donde se encontraron los árboles que mostraron mayor número de conos por verticilo, mientras que la población 8 (Cañón La Carbonera) que es la última población del grupo B, los árboles mostraron un menor número de conos por verticilo. Considerando el mecanismo fisiológico del árbol para las dos poblaciones contrastantes en este caso. Posiblemente para la población con menor número de conos por verticilo se deba a que no fue un año semillero, en este caso la variable en estudio no puede representar en realidad las diferencias entre poblaciones, quizá no debería usarse esta variable para el análisis de conglomerados porque probablemente presente diferentes valores en años consecutivos.

Para la variable largo del cono (LACO) se realizó la prueba Tukey con un alfa de 0.10, ya que con un alfa de 0.05 no presentaba grupos distintos. Comparando nuestros valores medios con los valores dados por Martínez (1948) y Perry (1991) están dentro del rango marcado para la especie que es de seis a nueve cm, la población 1 (Chapultepec) forma el grupo A y la población 3 (Entronque a Galeana) forma el grupo B, son las poblaciones contrastantes en esta variable ya que las poblaciones restantes son estadísticamente iguales a las poblaciones de los grupos A y B. Posiblemente un factor importante que influye indirectamente en la variación morfológica de conos es la dispersión de los árboles en esta población, también la posición de los árboles en la población 1 (Chapultepec) que se encuentran en las faldas de la montaña provoca la

diferencia, ya que la población 3 (Entronque a Galeana) se encuentra en planicie con poca exposición sur.

Cuadro 4. Análisis de varianza de cinco caracteres de conos de *Pinus arizonica* Engelm.

VARIABLE		FV	GL	CM
No. conos	(NCON)	Procedencia	8	0.987**
Largo conos	(LACO)	Procedencia	8	3.329*
Ancho conos	(ANCO)	Procedencia	8	2.516**
Largo umbo	(LARUM)	Procedencia	8	3.826ns
Ancho umbo	(ANCHU)	Procedencia	8	9.260**

FV=Fuente de Variación; GL=Grados de Libertad; CM=Cuadrados Medios esperados.

**=Altamente Significativo.

*=Significativo.

ns=No significativo.

La variable ancho del cono (ANCO) con las nueve poblaciones se formaron tres grupos, el grupo A lo forman las poblaciones 1 y 2 (Chapultepec y Sierra San Marcos), en estas poblaciones se encontraron los árboles que tienen los conos más anchos en promedio, mientras que en la población 9 (Guanaceví) se encontraron los árboles con los conos más pequeños. Recordando las variables de las acículas, la población 9 (Guanaceví) ha estado con valores menores, posiblemente lo provocan las características ambientales que ejercen presión sobre la especie que ha hecho cambiar su fenotipo con el paso del tiempo, también existe la posibilidad de que influyan las características fisiográficas en la especie de la población 9 (Guanaceví) ya que se encuentra en la Sierra Madre Occidental que difiere de las poblaciones que se encuentran en la Sierra Madre Oriental.

El ancho del umbo (ANCHU) en la prueba Tukey mostró que las poblaciones 2 (Sierra San Marcos) y 9 (Guanaceví) tiene la media más alta en el ancho del umbo, pero en el mismo grupo A se encuentran las poblaciones 1 (Chapultepec), 5 (Sierra La Casita), 6 (Sierra La Encantada), 3 (Entronque a Galeana), 4 (Los Lirios) y 7 (San Antonio de la Osamenta). La población 8 (Cañón La Carbonera) tiene la media más baja, lo que es estadísticamente diferente de las poblaciones 2 (Sierra San Marcos) y 9 (Guanaceví), las

poblaciones restantes pertenecen a ambos grupos. Probablemente se debe a la genética de la especie por presentar conos ovoides y simétricos, que al aumentar el tamaño del cono el umbo es más ancho, posiblemente la causa es que produce mejor semilla como respuesta a la poca precipitación como estrategia para conservar la especie en el lugar.

Cuadro 5. Resumen de los valores obtenidos de la prueba Tukey para las variables de conos de *Pinus arizonica* Engelm.

PROCEDENCIA (#)	NCON (#)	LACO (cm)	ANCO (cm)	ANCHU (mm)
1	1.7AB	9.4A	7.5A	15.4AB
2	1.7AB	9.2AB	6.9AB	15.6A
3	1.8AB	7.8 B	6.3 BC	13.9AB
4	1.7AB	8.4AB	6.8ABC	13.8AB
5	2.3A	8.1AB	6.1 BC	14.7AB
6	1.5 B	9.2AB	6.8ABC	14.3AB
7	1.6AB	8.6AB	6.8ABC	13.5AB
8	1.2 B	8.3AB	6.8ABC	12.9 B
9	1.3 B	8.2AB	5.8 C	15.5A

NCON=Número de conos por verticilo; LACO=Largo del cono; ANCO=Ancho del cono; ANCHU=Ancho del umbo.

1=Chapultepec, Saltillo, Coah.

2=Sierra San Marcos, Cuatrociénegas, Coah.

3=Entronque a Galeana, Galeana, Nuevo León.

4=Los Lirios, Arteaga, Coah.

5=S. La Casita, Parras, Coah.

6=S. La Encantada, Ocampo, Coah.

7=S. Antonio de la Osamenta, Arteaga, Coah.

8=La Carbonera, Arteaga, Coah.

9=Guanaceví, Guanaceví, Dgo.

NOTA: Letras iguales en la prueba Tukey son estadísticamente iguales.

La variable largo del umbo (LARUM) con el análisis de varianza mostró no tener diferencias entre poblaciones, al tener los resultados del análisis anterior se decidió no hacer la prueba Tukey. Probablemente las diferencias climáticas entre las poblaciones no fueron lo suficientemente fuertes como para causar diferencias significativas en esta característica.

Análisis de correlación

Se presentan únicamente los resultados del análisis de correlación que resultaron significativos en acículas (Cuadro 6). La variable altitud y la variable número de acículas por fascículo tienen una correlación positiva, grande (0.785) y altamente significativa, lo que indica que las poblaciones a mayor altura sobre el nivel del mar en este estudio, resultaron tener mayor número de acículas. Considerando que en mayores altitudes hay más humedad por el choque de las nubes con las partes altas de las montañas y la menor temperatura, posiblemente el árbol forma más acículas por tener mayor disponibilidad de humedad.

Cuadro 6. Resultados del análisis de correlación para las variables en acículas.

	Altitud (msnm)	Temperatura Centígrados	No. de acículas	Largo de acículas	de Ancho de acículas	No. de estomas	de
No. de acículas	0.7854 0.0121						
Largo de acículas	-0.7640 0.0165	0.6354 0.0659	-0.7065 0.0334				
Ancho de acículas			-0.9001 0.0009	0.7669 0.0159			
No. de estomas			-0.6638 0.0512		0.7354 0.0239		
No. de serraciones						0.9462 0.0001	

Para la altitud y largo de la acícula, la correlación resultó ser negativa, grande (-0.764) y altamente significativa, lo que significa que a mayor altitud tienden a ser más cortas las acículas. Tomando en cuenta la correlación positiva entre la altitud y el número de acículas por fascículo, posiblemente la correlación negativa entre altitud con tamaño de la acícula se deba a que el árbol forma sus defensas, ya que a mayor altitud se presentan

nevadas más frecuentes, de tal manera que el árbol forma acículas más pequeñas para evitar los desgarres por causa de la nieve.

La temperatura promedio anual del sitio con el largo de las acículas resultó ser una correlación positiva (0.635) significativa, lo que indica que en las poblaciones donde es mayor la temperatura promedio anual hay árboles con acículas más largas. Probablemente las poblaciones donde se presenta mayor temperatura se encuentran más al Sur y considerando la precipitación media anual de las poblaciones, entendemos que al haber más temperatura hay más radiación solar y está a la vez provoca que el árbol presente más área foliar para fotosintetizar, que se manifiesta con acículas más grandes.

Entre el largo de la acícula y el número de acículas por fascículo existe una correlación negativa, grande (-0.706) y altamente significativa, esto se puede interpretar como que las poblaciones que disminuyen en número de acículas por fascículo tienen acículas más grandes. Recordando que al tener mayor altitud tienen mayor número de acículas y relacionándolo, que a menor altitud hay mayor largo de la acícula, posiblemente sea debido a la influencia de las características fisiográficas, que intervienen indirectamente ya sea porque hay mayor precipitación a mayor altitud, o bien porque la disminución de temperatura tiende a reducir el tamaño de la acícula.

Para el número de acículas y el ancho de las mismas, se presentó una correlación negativa, grande (-0.900) y altamente significativa, lo que se interpreta que en las poblaciones donde hay mayor número de acículas por fascículo, tienen más angostas las acículas, es decir al unir el número de acículas por fascículo forma un círculo que al hacer más divisiones lógicamente son más angostas.

Existe una correlación positiva, grande (0.766) y altamente significativa, entre el largo de la acícula y ancho de las mismas, lo que indica que existen poblaciones que tienen el follaje más grande como ya mencionó Martínez (1948) y Perry (1991) que esta especie presenta acículas tiesas y fuertes, por lo que forma acículas más grandes y gruesas.

Para los coeficientes de número de acículas por fascículo y número de estomas por cm en las tres caras de la acícula la correlación resultó ser negativa (-0.663) y es significativa. Lo anterior es debido probablemente a que las poblaciones que tienen

mayor número de acículas tienen un menor número de estomas por cm en las tres caras de la acícula. Probablemente se deba a un proceso fisiológico que al tener más acículas reduce el número de estomas en las acículas, para no perder cantidades altas de agua y mantener un equilibrio hídrico.

Una correlación que resulta positiva, grande (0.735) y altamente significativa, es para el número de estomas por cm en las tres caras y ancho de la acícula, en las poblaciones que tienen más gruesas las acículas tienden a formar mayor número de estomas por cm en las tres caras de la acícula. Probablemente donde la humedad no es un factor limitante, el árbol para tener más actividad fisiológica forma más estomas para una mayor transpiración, lo que provoca tener más anchas las acículas.

Existe una correlación positiva, grande (0.946) y altamente significativa entre el número de serraciones por cm y el número de estomas por cm en las tres caras. Ello significa que en las poblaciones que tienen mayor número de serraciones por cm también tiene mayor número de estomas, posiblemente los factores climáticos y fisiográficos influyen de la misma manera en las dos variables.

La precipitación y largo del cono presentó una correlación negativa (-0.694) y significativa, lo que indica que en las poblaciones donde hay poca precipitación los conos son más largos. Posiblemente se deba a que el árbol dirige todas sus reservas estando en dichas condiciones hacia los conos, lo que provoca que crezca más el cono y forme más semillas, como estrategia de la especie para perpetuarse (Cuadro 7).

Existe una correlación negativa, grande (-0.812) y altamente significativa, entre la precipitación y el largo del umbo, lo que indica en las poblaciones con menor precipitación tendremos el umbo más largo. Conociendo la forma del cono y considerando la correlación negativa entre la precipitación y largo del cono se puede decir que teniendo menos precipitación hay conos más grandes que provoca que tengamos en las escamas de los conos el umbo más largo.

Cuadro 7. Resultados del análisis de correlación para las variables en conos.

	Precipitación	Largo de cono	Largo de umbo
Largo de cono	-0.6946		
	0.0378		
Ancho de cono		0.7824	
		0.0127	
Largo de umbo		0.6869	
		0.0409	
Ancho de umbo			0.7602
			0.0174

Existe una correlación positiva, grande (0.784) y altamente significativa, entre largo del cono y ancho del mismo, esto indica que en las poblaciones con conos largos tienen también conos más anchos. Esto es debido a que *Pinus arizonica* tiene conos ovoides, casi extendidos, simétricos, estas variables se encuentran similares con las reportadas por Martínez (1948).

La correlación entre el largo del umbo y ancho del mismo resultó positiva, grande (0.760) y altamente significativa, lo que indica que en las poblaciones que tiene un mayor largo del umbo también tiene un mayor ancho del umbo, dando como resultado escamas más grandes, posiblemente al igual que las variables de las acículas están asociadas unas con otras, en el caso de los conos al tener un cono más grande, las demás variables del cono tienen valores más altos.

Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados agrupó a las poblaciones por similitudes de las variables estudiadas, correlacionadas entre sí. La distancia euclidiana promedio máxima fue de 1.4, al realizar un corte a las dos terceras partes de esa distancia (0.93), se definen cuatro grupos.

Los grupos formados son los siguientes:

Grupo I integrado por las poblaciones 4 (Los Lirios) y 7 (San Antonio de la Osamenta) en las variables evaluadas, estas dos poblaciones tienen los valores más parecidos estando en el mismo grupo la población 8 (Cañón la Carbonera).

Grupo II que lo forman las poblaciones 2 (sierra San Marcos), 6 (Sierra La Encantada) y 1 (Chapultepec), resultando muy parecidas las poblaciones 2 (Sierra San Marcos) y 6 (Sierra La Encantada) en las variables evaluadas.

Grupo III formado por las poblaciones 3 (Entronque a Galeana) y 5 (Sierra la Casita).

Grupo IV que lo forma la población 9 (Guanaceví), que es totalmente diferente a las demás por tener valores diferentes en las variables morfológicas evaluadas y por estar ubicada geográficamente más al Oeste y a una mayor altitud.

El agrupamiento entre las poblaciones del grupo I se basa principalmente en que están ubicadas geográficamente cerca una de otra y tienen en común, que cada población se encuentra entre cañones montañosos donde existe mayor precipitación y más alta humedad relativa con menor temperatura media anual, estos factores directa o indirectamente influyen en el fenotipo de la especie provocando diferencias con otras poblaciones en las variables morfológicas, como es el caso del grupo II, que en este caso particular las poblaciones 2 (Sierra San Marcos) y 3 (Entronque a Galeana), forman un bosque puro encontrándose en mesetas con poca pendiente y para la población 1 (Chapultepec) se encuentra en las faldas de la montaña con exposición Norte, tienen diferencias geográficas grandes, sin embargo son muy parecidas morfológicamente a las poblaciones del grupo I. Las causas posibles de las separaciones en grupos es debido a factores ambientales que ejercen presión en las variables morfológicas estudiadas.

El grupo II tiene parecido su fenotipo al del grupo III, la población 3 (Entronque a Galeana) junto con la población 5 (Sierra La Casita), son las poblaciones que se

encuentran más al Sur, teniendo en común poca exposición Sur, lo que provoca diferencias morfológicas marcadas con las poblaciones del grupo I.

La influencia del hombre en el bosque se nota claramente, al encontrar poblaciones contrastantes en su fenotipo. Posiblemente debido al hacer selección de árboles en el rodal, se encuentran poblaciones diferentes en caso particular, la población 9 (Guanaceví) que forma un solo grupo, el grupo IV es contrastante en el fenotipo con los tres grupos de poblaciones restantes.

La población 9 (Guanaceví) tiene grandes diferencias morfológicas con respecto a las otras poblaciones evaluadas en la mayoría de las variables; se supone que estas diferencias morfológicas se deben a un intercambio restringido de genes con el resto de las poblaciones. Es posible que estas diferencias se deban a una selección del arbolado favoreciendo a una mayor frecuencia de combinaciones génicas entre los árboles que se encuentran en la población, también se están adaptando para crecer y reproducirse bajo condiciones ambientales al sitio en el cual se están desarrollando (Wright 1964; Barret, 1972; Zobel y Talbert, 1988).

Las poblaciones 3 (Entronque a Galeana) y 5 (Sierra La Casita) que forman el grupo III tienen semejanza entre ellos por los valores obtenidos, tienen un distanciamiento geográfico considerable, por lo que se piensa que las poblaciones han tenido una evolución similar por medio de la selección natural, al estar sometidas a las mismas presiones ambientales (Callahan, 1964).

Al hacer un corte a seis séptimas partes de la máxima distancia euclidiana promedio (1.2) se agrupan perfectamente dos grupos de poblaciones y se representa un grupo formado únicamente por la población 9 (Guanaceví) y otro grupo formado por las ocho poblaciones restantes, es decir, las poblaciones de la Sierra Madre Oriental forman un grupo aparte de la población de la Sierra Madre Occidental, donde se colectó a una altitud de 2960 m que tiene suelos originados en rocas volcánicas.

Para la Sierra Madre Oriental algunas ocasiones alcanzan elevaciones de hasta 2800 m como en el caso de Los Lirios y tienen suelos originados en rocas calizas sedimentarias de origen marino que son características en casi todo lo largo de la sierra. Las vertientes

montañosas directamente expuestas a la acción de vientos procedentes del mar son a menudo afectadas por la neblina, sobre todo, la Sierra Madre Oriental y en menor grado, la Sierra Madre Occidental. El interés ecológico de la neblina estriba principalmente en el hecho de que al impedir la insolación directa y al mantener alta la humedad del aire reduce al mínimo las pérdidas de agua por parte de las plantas (Rzedowski, 1986).

CONCLUSIONES

- La variable largo del umbo con el análisis de varianza mostró no tener diferencias entre poblaciones.
- La variable altitud y la variable número de acículas por fascículo tienen una correlación positiva, grande (0.785) y altamente significativa, lo que indica que las poblaciones a mayor altura sobre el nivel del mar en este estudio, resultaron tener mayor número de acículas.
- Para la altitud y largo de la acícula, la correlación resultó ser negativa, grande (-0.764) y altamente significativa, lo que significa que a mayor altitud tienden a ser más cortas las acículas.
- Para el número de acículas y el ancho de las mismas, se presentó una correlación negativa, grande (-0.900) y altamente significativa, lo que se interpreta que en las poblaciones donde hay mayor número de acículas por fascículo, tienen más angostas las acículas, es decir al unir el número de acículas por fascículo forma un círculo que al hacer más divisiones lógicamente son más angostas.
- El análisis de conglomerados agrupó a las poblaciones por similitudes de las variables estudiadas, correlacionadas entre sí. La distancia euclidiana promedio máxima fue de 1.4.

LITERATURA CITADA

Barret, W. H. G.

- 1972 **“Variación de caracteres morfológicos en poblaciones naturales de *Pinus patula* Schl. et Cham. en México”**. I.D.I.A. Suplemento Forestal. No. 7: 9-35.

Bell, R. C.

- 1968 **“Variación y clasificación de las plantas”**. Ed. Herrero Hermanos Sucesores, S.A. México. 142 pp.

Callaham, R. Z.

- 1964 **“Investigación de procedencias: estudio de la diversidad genética asociada a la geografía”**. Unasylva 18 (2-3).

Cetenal

- 1975a **“Carta Geológica”**. G14 C34 Saltillo. Esc. 1:50 000 Secretaria de la Presidencia.
1975b **“Carta Topográfica”**. G14 C32 General Cepeda Esc.1:50 000 Secretaria de la Presidencia.
1975c **“Carta Topográfica”**. G14 A11 Guadalupe. Esc. 1:50 000 Secretaria de la Presidencia.

Martínez, M.

- 1948 **“Los Pinos Mexicanos”**. 2a. Edición Ed. Botas México 361 pp.

Perry J.P.

- 1991 **“The Pines of Mexico and Central America”**. Ed. Timber Press. Portland, Oregon. 231 pp.

Rzedowski, J.

- 1986 **“Vegetación de México”**. Ed. LIMUSA. México. 431 pp.

Statistical Analysis System.

- 1985 **“User’s Guide: Statics”**. Versión 6. 1028 pp.

Schoenike, R. E.

- 1976 **“Geographical variation in jack pines (*Pinus banksiana* Lamb.)”** Agricultural Experiment Station. University of Minnesota. Tech. Bull. 47:3

Snedecor G.W.

- 1970 **“Métodos Estadísticos”**. CECSA. México. p. 32-58.

Wright J.W

1964 **“Mejoramiento genético de los árboles forestales. FAO Estudios de Silvicultura y Productos Forestales”**. No.16 Roma. 436 pp.

Yañez M.

1981 **“Estudio de variación de algunas características de *Pinus strobus* var. *chiapensis* de tres localidades de su distribución natural”**. Tesis profesional. UACH. Chapingo, México. 173 pp.

Zobel J. B. y J. Talbert

1988 **“Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales”**. LIMUSA, México. 595 pp.

Ra Ximhai

Revista de Sociedad, Cultura y
Desarrollo Sustentable

Ra Ximhai

Universidad Autónoma Indígena de México

raximhai@uaim.edu.mx

ISSN: 1665-0441

México

2005

MODELOS DE ÍNDICE DE SITIO PARA *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. DEL CLON IAN-710 EN EL NORTE DE CHIAPAS

Gustavo Enrique Rojo Martínez; Jesús Jasso Mata; Xiomara Zazueta Angulo; César

Raúl Porras Andujo; Alejandro Velásquez Martínez

Ra Ximhai, enero-abril, año/Vol.1, Número 1

Universidad Autónoma Indígena de México

Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa

pp. 153-166

MODELOS DE ÍNDICE DE SITIO PARA *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. DEL CLON IAN-710 EN EL NORTE DE CHIAPAS

SITE INDEX MODELS FOR *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. OF CLONE IAN-710 IN NORTH CHIAPAS

Gustavo Enrique **Rojo-Martínez**¹; Jesús **Jasso-Mata**²; Xiomara **Zazueta-Angulo**³;
César Raúl **Porras-Andujo**⁴; Alejandro **Velázquez-Martínez**²

¹Clarificador Educativo C. Universidad Autónoma Indígena de México. Ingeniería en Sistemas Forestales. Los Mochis, Sinaloa. Correo electrónico: grojo@uaim.edu.mx. ²Colegio de Postgraduados. IRENAT Programa Forestal. Correo electrónico: jejama@colpos.mx; avelazquez@colpos.mx. ³Clarificador Educativo A. Universidad Autónoma Indígena de México. Correo electrónico: xzazueta@uaim.edu.mx. ⁴Clarificador Educativo B. Universidad Autónoma Indígena de México. Ingeniería en Sistemas de Calidad. Correo electrónico: cporras@uaim.edu.mx.

RESUMEN

La calidad de sitio forestal se entiende como la capacidad productiva de dicho lugar y habitualmente se refiere al volumen de madera producido por una masa forestal cuando llega a la edad del turno. La calidad del sitio tiene entonces una doble utilidad práctica: como herramienta para estimar la producción y como base para construir instrumentos prácticos de gestión de plantaciones forestales comerciales. El modelo elegido fue el que representó menor valor de CME, modelo 1, basado en la función de Chapman y Richards y modificada por Payandeh y Wang.

Palabras clave: Índice de sitio, curvas de crecimiento, modelos alométricos.

SUMMARY

The quality of forest site is understood as the productive capacity of the place and it is commonly related to the volume of wood produced by a forest mass when it arrives at the age of the turn. The quality of the site has then one double practical utility: as a tool to estimate the production and as a base to build practical management instruments for commercial forest plantations. The selected model displayed minor value of CME, model 1, based on the Chapman and Richards function and modified by Payandeh and Wang.

Key words: Site index, curves of growth, allometric models.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de un árbol o de una masa forestal está representado por su respectivo desarrollo, es decir, por el aumento en sus dimensiones: altura, diámetro, área basal y volumen. Este crecimiento, considerado en un período de tiempo determinado se denomina incremento, el cual representa un aumento en la cantidad de tejido acumulado de floema y xilema en forma de corteza y madera respectivamente (Klepac, 1983).

En general, los modelos de crecimiento y rendimiento son modelos simbólicos que representan procesos de la realidad. En manejo forestal, se elaboran con la finalidad de estimar la producción futura, determinar el turno óptimo, realizar análisis financieros, estimar el crecimiento bajo condiciones donde no existen datos, comparar alternativas de manejo para analizar las mejores opciones de uso de la tierra, simular prácticas silviculturales y sintetizar hipótesis, conocimientos y datos experimentales a una expresión entendible del comportamiento de los bosques (Dykstra, 1984).

Para modelar el crecimiento de árboles y masas forestales, en la actualidad se consideran dos métodos de construcción: los modelos de proceso y los empíricos. Los primeros simulan los procesos biológicos mediante los cuales se elabora la biomasa del organismo, y los segundos, basados en la experiencia. El crecimiento es considerado como la respuesta de un sistema complejo, sobre el que actúa un gran número de variables, pero en pocas de ellas, frecuentemente sólo la edad se considera para el modelaje (Ramírez y Zepeda, 1994).

Los modelos de crecimiento y de rendimiento constituyen una herramienta de gran valor para la planificación de las actividades de manejo forestal. El concepto básico del bosque o de una plantación forestal comercial, como fuentes continuas de productos forestales descansa en la capacidad que se tiene para crecer. Los bosques o plantaciones usualmente son manejados para obtener un rendimiento sostenido de productos. Un rendimiento sostenido requiere un nivel de producción constante para una intensidad de manejo particular, lo cual implica que el crecimiento del bosque o plantación debe ser estimado y balanceado con la cosecha. De esta manera el rendimiento sostenido se refiere al rendimiento potencial del bosque o plantaciones (Ramírez y Zepeda, 1994).

Cualquier planeación de la producción forestal debe involucrar la predicción del rendimiento futuro. Las empresas forestales deben saber cuales son los rendimientos futuros esperados en sus áreas forestales, con el fin de planear la producción de la planta y examinar las posibilidades de expansión (Meyer *et al.* , 1961).

En general, estos modelos se elaboran para efectuar estimaciones confiables del crecimiento y del rendimiento futuro; para generar la información necesaria que permita mantener las cosechas dentro de la capacidad sustentable de los rodales; para comparar alternativas de manejo que permitan analizar las mejores opciones de uso de la tierra; para determinar la edad óptima de cosecha, la programación de las cortas intermedias, la estimación de la producción anual, periódica o total durante el período de rotación y las clases de productos a obtener; para realizar análisis financieros, para explorar opciones de manejo y alternativas silviculturales; para examinar los impactos del manejo forestal y de la cosecha sobre otros valores del bosque; y, para determinar un régimen de manejo que maximice el volumen maderable o el valor de la producción (Klepac, 1983).

Generalidades sobre modelos de crecimiento

De acuerdo con Zeide (1993), el crecimiento resulta de la interacción de dos fuerzas opositoras: un componente positivo manifestado por la expansión de un organismo que tiende hacia la multiplicación exponencial, este componente está asociado con el metabolismo constructivo o anabolismo. Un componente opositor que representa las restricciones impuestas por factores externos como la competencia por recursos, respiración, estrés, es decir el catabolismo.

En el ámbito forestal, el crecimiento es considerado como una función que depende directamente de los factores del sitio que se encuentran interactuando en el rodal, formulada en términos de tasa de crecimiento e integrada en el tiempo. La forma general de dicha función en un tiempo dado es:

$$\text{Crecimiento} = f(\text{especie, edad, densidad, calidad de sitio})$$

Alder (1980), considera que el crecimiento es un proceso biológico que involucra dos procesos: uno que impulsa al organismo a aumentar de tamaño mediante la acumulación de la energía bioquímica y, el otro, que frena el crecimiento mediante el gasto de energía para realizar sus funciones fisiológicas. Estos dos procesos son conocidos como los procesos anabólicos y catabólicos respectivamente. Estos procesos se expresan con la relación siguiente:

$$\text{Crecimiento} = \beta_0 (\text{superficie}) - \beta^1 (\text{volumen})$$

Si se conoce la función para determinar la superficie de un organismo (conocer la magnitud de los procesos anabólicos) y la del volumen o biomasa (conocer la magnitud de los procesos catabólicos), es posible obtener la ecuación específica del crecimiento (incremento corriente anual). Bertalanffy en 1957 fue el primero en desarrollar esta ecuación, la cual, generalmente, se presenta en la forma siguiente (Ramírez y Zepeda, 1994):

$$ICA = \alpha W^m - \beta W$$

Donde:

ICA: Incremento corriente anual

W: Volumen

m: 2/3 y

α , β : Parámetros a ser estimados.

Desde el punto de vista biológico, el crecimiento de los árboles es resultado de un proceso biológico muy complejo que intercala con la herencia, los factores ambientales y con las prácticas de cultivo, resultando un desarrollo en tamaño de los árboles, como producto de la división y expansión celular.

Aunque varios autores piensan que un proceso tan complejo como el crecimiento, difícilmente puede ser expresado por una ecuación matemática que refleje el fenómeno biológico del árbol; pero visto del manejo silvícola, los resultados son de extremo valor (Amo y Nieto, 1983).

Variables dasométricas como la altura, el diámetro normal o el volumen, como una función de la edad del árbol, es una relación que sigue un patrón que puede ser representada por una curva logística, que a su vez es descrita por una ecuación. Esta curva tiene un crecimiento inicial lento, seguido de una fase de crecimiento acelerada; otra etapa en que ese crecimiento se desacelera gradualmente, hasta que el organismo deja de crecer, permanece de un mismo tamaño durante algún tiempo y finalmente muere. A la primera derivada de la curva de crecimiento se le conoce como incremento corriente y, a la razón entre la ordenada y la abscisa de la curva de crecimiento incremento se le llama incremento medio. La culminación del incremento corriente coincide con el punto de inflexión de la curva de crecimiento, mientras que la culminación del incremento medio ocurre siempre después y corresponde al punto donde la tangente del ángulo máximo trazado desde el origen de los ejes coordenados toca a la curva de crecimiento; el incremento corriente es igual al incremento medio cuando este último culmina (Davis y Johnson, 1987; Ramírez y Zepeda, 1994).

La predicción del rendimiento, es una aplicación importante de los modelos de crecimiento, pero el rendimiento también puede ser estimado por técnicas de simulación. Los modelos de crecimiento facilitan la estimación del rendimiento en rodales homogéneos en varios regímenes de manejo, pero la estimación del estado del bosque, también debe involucrar el espacio y distribución temporal de los rendimientos, por lo que, la estimación del rendimiento puede apoyarse en las técnicas de programación matemática para encontrar la ruta óptima, que maximice el rendimiento sustentable y flujo declinante de la corta (Klepac, 1983).

El crecimiento y rendimiento de un bosque, puede ser modelado a tres niveles básicos (Zepeda, 1990):

- 1) con modelos de totalidad del rodal
- 2) con modelos de distribuciones por clases de tamaño y

3) con modelos para árboles individuales

Los modelos de totalidad del rodal, se caracterizan porque la solución de las ecuaciones que comprende el sistema, proporcionan la estimación del volumen por unidad de área y la predicción puede ser para estimar el rendimiento actual, el cual no considera la densidad de la proyección futura o rendimiento futuro. Los modelos por clases de tamaños aportan más detalles por simular varias clases dentro del rodal por ejemplo: proyección de tablas a nivel rodal. La aproximación es una premisa en los modelos para el rodal (una clase simple para todos los árboles) y un modelo de árboles individuales (una clase para cada árbol). La mínima entrada requerida para modelos de árboles individuales es una cantidad de árboles dentro del mismo rodal (Klepac, 1983).

Para el manejo del bosque, se requiere además de ecuaciones de crecimiento simples como el volumen, modelos para predecir tamaños; por ejemplo, la altura y el volumen pueden ser expresados como funciones alométricas del diámetro, y su distribución en tamaños, puede ser estimada con la distribución Weibull (Vanclay, 1995).

Un modelo de crecimiento se considera efectivo si está expresado en función de variables predictoras fáciles de medir, con un coeficiente de determinación relativamente alto, por arriba de 0.8. Mientras menor número de variables predictoras estén implicadas en un modelo, más apropiado es para ser usado; con muchas variables predictoras, el modelo se vuelve muy sensible a las relaciones entre ellas, especialmente, si algunas de esas variables están altamente correlacionadas (Alder, 1980).

Los métodos estáticos de predicción de rendimiento, son aquellos en los cuales el rendimiento se predice directamente como una función de la edad, clase de sitio e historia de la densidad del rodal. Los métodos se consideran estáticos porque las funciones resultantes del rendimiento no permiten variación alguna en la historia de los tratamientos del rodal, excepto dentro de amplias clases de tratamientos de aclareos implícitos en los datos. Los componentes del rendimiento de mayor interés para el administrador forestal son: el volumen y el diámetro promedio. Para conocer el volumen de los rodales, es necesario conocer su número de árboles, la altura y el diámetro promedio (Alder, 1980).

En cuanto al modelaje del crecimiento de especies forestales, (Zepeda, 1990), efectuó una revisión muy completa de las técnicas aplicadas al modelaje, principalmente para árboles de clima templado; siendo escasa su aplicación en la predicción de crecimiento en árboles tropicales.

De acuerdo con Clutter *et al.* (1983), el modelo de Schumacher es muy utilizado para generar curvas anamórficas de índice de sitio. Este modelo inicialmente se desarrolló para relacionar el volumen con la edad, y parte del supuesto que el crecimiento relativo varíe inversamente con el cuadrado de la edad, que para la altura queda expresado de la forma siguiente:

$$H = \beta^0 * e^{(-\beta^1 * E - 1)};$$

Donde:

H : Altura de los árboles dominantes y codominates (m)

E : Edad (años)

e : Base de logaritmos naturales

β_0 : Parámetro del valor asintótico y

β_1 : Parámetro de la tasa de cambio.

Una curva de crecimiento es una representación gráfica de tamaños acumulados, ésta representa la suma de todos los incrementos anuales acumulados sobre el período de observación. Así, el crecimiento puede ser considerado como la suma de los incrementos anuales, y el incremento, como la tasa de cambio de ese crecimiento. Debido a lo anterior, la función del incremento corriente anual puede ser obtenida tomando la primera derivada de la función del crecimiento con respecto a la edad. De igual forma, la función del crecimiento puede generarse mediante integración matemática de la función del incremento corriente (Zeide, 1993).

Una curva de crecimiento típica toma generalmente una forma sigmoide. Empieza en el origen o en un punto fijo, sube lentamente al principio y luego con mayor velocidad. Posteriormente hay un cambio del gradiente (punto de inflexión) de la curva, disminuyendo el incremento, para después moverse asintóticamente hacia adelante a algún valor final, determinado por la naturaleza genética del organismo y de sus limitaciones ambientales (Klepac, 1983).

La curva del incremento corriente inicia en el valor de cero, aumenta lentamente al principio y después rápidamente. Después de un máximo, el incremento disminuye, para posteriormente acercarse asintóticamente a cero. La culminación del incremento en esta curva coincide con el punto de inflexión de la curva de crecimiento (Klepac, 1983).

El rendimiento, por otra parte, se refiere a la cantidad total de madera susceptible de ser cosechada (o realmente cosechada) en un tiempo y en un sitio dado. A diferencia de la producción, que representa toda la madera inventariable producida en un sitio (sea bruta o neta), el rendimiento es la cantidad total efectiva de producto útil, por eso, el rendimiento de un rodal, puede ser menor o igual que su producción (Zeide, 1993).

La información para generar estos modelos generalmente se obtiene a través de parcelas permanentes ubicadas en los rodales, evaluados desde su establecimiento hasta su cosecha; pero en la práctica tradicional, la información puede ser obtenida a partir de parcelas temporales ubicadas en los rodales de modo tal que se cubra un rango amplio de edades y calidades de sitio (Zeide, 1993).

Las mejores variables independientes para predecir el crecimiento, ya sea en volumen, altura, diámetro o área basal, deben ser seleccionadas mediante un análisis estadístico objetivo, a través del cual se determine que estas variables estén relacionadas individualmente y en forma conjunta con la variable dependiente de interés (Klepac, 1983).

El manejo actual de las plantaciones forestales comerciales ha obligado a los especialistas en el tema a generar modelos matemáticos para estimar los índices de sitio (Klepac, 1983).

Las ecuaciones de índice de sitio son herramientas útiles que permiten predecir con bastante exactitud los volúmenes de las especies forestales en función de un número más o menos reducido de parámetros obtenidos de árboles en pie. Sin embargo, la disponibilidad de las mismas para especies latifoliadas es muy reducida (Alder, 1980).

En México se han desarrollado este tipo de ecuaciones (Rodríguez y Flores, 1989). Sin embargo, no se disponen de ecuaciones de biomasa para el árbol del hule (*H.*

brasiliensis), a pesar de su importancia industrial en México, con un consumo medio anual de látex natural de 70 mil Mg año⁻¹.

La producción de látex se ha estimado en alrededor de 7,000 Mg año⁻¹, por lo que se tiene una importación anual promedio de 63 mil Mg año⁻¹, que representa el 90 % de las necesidades del país (CMH, 2000). Por lo que el objetivo de este estudio fue determinar el índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Müll Arg. del clon IAN-710 en el norte de Chiapas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio comprende la zona hulera ubicada en la zona norte de Chiapas en el municipio de Palenque. Se localizaron plantaciones de hule del clon IAN-710 de 1 a 42 años de edad, siendo en la práctica, en muchos casos, muy difícil diferenciar si las plantaciones fueron procedentes de planta en bolsa o tocón; representando la muestra una mezcla de todo tipo de producción de planta en vivero.

Se instalaron 36 sitios de muestreo temporales de forma circular. En cada parcela se señalaron y se aparearon dos árboles dominantes que no diferían ± 5 % del diámetro dominante y altura dominante de la parcela, siguiendo para ello la metodología propuesta por Madrigal en 1992.

Cada árbol de la muestra se troceó y se extrajeron rodajas de madera cada metro de longitud del fuste. El análisis de tronco de estos árboles dominantes permite reconstruir las curvas de altura de cada árbol y su distancia a la base del árbol.

De acuerdo con los datos de parcelas disponibles, aquí se consideró razonable considerar como edad de referencia 42 años. Asignando un índice de calidad de estación a cada árbol se cuenta con un conjunto de datos en el que se conocen tres variables: altura dominante (H_0), edad (t) e índice de sitio (IS). Se utilizaron modelos denominados con restricciones en los que se fuerza a que la altura dominante coincida con el índice de calidad de estación a la edad de referencia. Los modelos empleados son los que aparecen en el Cuadro 1.

Cuadro 1.- Modelos utilizados en el ajuste de las curvas de calidad de estación.

Chapman-Richards polimórfica (Payandeh y Wang, 1994)	$H_0 = b_0 \cdot IS^{b_1} \cdot (1 - \exp(-b_2 \cdot t))^K$ [1]
	$K = \frac{\ln\left(\frac{IS^{1-b_1}}{b_0}\right)}{\ln(1 - \exp(-50 \cdot b_2))}$
Weibull polimórfica (Payandeh y Wanng, 1994)	$H_0 = K \cdot (1 - \exp(-b_2 \cdot t^{b_3} IS^{b_4}))$ [2]
	$K = IS / (1 - \exp(-b_2 \cdot 50^{b_3} IS^{b_4}))$
Chapman-Richards anamórfica (Biging y Wensel , 1985)	$H_0 = K \cdot IS^{b_1} (1 - \exp(b_2 \cdot t))^{b_3}$ [3]
	$K = IS / IS^{b_1} (1 - \exp(b_2 \cdot 50))^{b_3}$
Chapman-Richards polimórfica (Burhart y Tennent, 1977)	$H_0 = K \cdot (1 - \exp(-b_2 \cdot IS \cdot t))^{b_3}$ [4]
	$K = IS / (1 - \exp(-b_2 \cdot IS \cdot 50))^{b_3}$
Weibull anamórfica (Bailey, 1980)	$H_0 = K \cdot IS^{b_1} (1 - \exp(-b_2 \cdot t^{b_3}))$ [5]
	$K = IS / IS^{b_1} (1 - \exp(-b_2 \cdot 50^{b_3}))$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros obtenidos se presentan en el Cuadro 2. La regresión no lineal se efectuó sobre 1034 pares de datos altura-diámetro, a los que previamente les fue asignado el correspondiente índice de sitio mediante interpolación lineal sobre la serie temporal de cada árbol.

La comparación de las estimaciones de los modelos se ha basado en estadísticos obtenidos a partir de los residuos y que son usados con frecuencia en la literatura. Estos estadísticos son el Cuadrado medio del error (CME), la desviación estándar de los residuos (S), la media de los valores absolutos de los residuos (E) y el sesgo (G). Como los modelos se han ajustado al mismo conjunto de datos y la variable dependiente es común a todos ellos, también se usó el coeficiente de determinación R^2 para compararlos (Cuadro 3).

Cuadro 2. Valores de los parámetros estimados mediante el análisis de regresión.

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
1	2.0210	0.9661	0.0195	-	-
2	-	-	0.00659	0.5273	0.3249
2	-	0.9661	0.0195	1.3043	-
4	-	-	0.00144	1.3563	-
5	-	0.9672	0.00707	1.2217	-

Los datos del cuadro 3 muestran un buen ajuste de todos los modelos empleados. Se ha representado la función de Weibull modificada por Payandeh y Wang (1994) como modelo con mejor coeficiente de determinación; sin embargo, al representar las curvas para distintos índices de sitio se observa un mal comportamiento de la asíntota para las calidades superiores, por lo que se ha decidido utilizar el modelo que presenta menor valor de CME, modelo 1, basado en la función de Chapman y Richards y modificada por Payandeh y Wang (1994). Por lo tanto, la expresión definitiva de la curva es la siguiente:

$$H_0 = 2,0210 \cdot IS^{0,9661} \cdot (1 - \exp(-0,0195 \cdot t))^K$$

Cuadro 3. Comparación entre funciones mediante estadísticos basados en los residuos y el R².

Modelo	CME	E	S	G	R ²
1	0.7780	-0.0617	0.8785	0.6323	0.9700
2	0.8083	-0.0169	0.8729	0.6463	0.9723
3	0.7887	-0.0814	0.8866	0.6306	0.9700
4	0.8109	-0.0970	0.8944	0.6366	0.9668
5	0.7846	-0.0147	0.8844	0.6279	0.9702

CONCLUSIONES

Es posible estimar curvas de índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. del clon IAN-710 a partir de ecuaciones de regresión. El ámbito de aplicación de las curvas es en el norte de Chiapas en el Municipio de Palenque y el rango de aplicación de las curvas está entre los 1 y 42 años.

Cualquier uso que se le dé fuera de esta región podría representar sesgos en la estimación de la producción. Existen muy pocos estudios sobre el árbol del hule en México y en general sobre los clones de esta especie en México. Por lo Tanto, es importante realizar más estudios sobre esta especie, que permitan conocer las características de productividad de madera.

LITERATURA CITADA

Alder D.

- 1980 **“Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos”**. Vol 2: predicción del rendimiento. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Estudio FAO: Montes. Roma. 118 pp.

Amo Del. R., C. y J. Nieto De P.

- 1983 **“Aplicación de ecuaciones y modelos matemáticos en la evaluación en las tasas de crecimiento y determinación de la edad en árboles tropicales”**. In: F.H. Bormann y G. Berlyn (ed.) Edad y tasa de crecimiento de los árboles tropicales. Trad. Del inglés por Carmen Alicia de la Parra. ed. Continental, Xalapa, Veracruz. México. P. 133-138.

Bayley R.L.

- 1980 **“The potential of Weibull-type fuctions as flexible growth curves: discusion”**. Canadian Journal of Forest Research, 10: 117-118.

Biging G y Wensel L.C.

- 1985 **“Improved estimates of site index curves using a varying parameter model”**. For. Sci. 31(1):248-259.

Burhart T. y Tennent W.

- 1977 **“Predicting height increment of young-growth mixed conifes”**. USDA, For. Sev. Pacific Southwest Forest and Range Exp. Sta. Berkeley, CA. Res. Paper PSW-191. 77 pp.

Clutter J. Forston J., Penaar L., Brister G. y Bailey R.

- 1983 **“Timber management: a quantitative approach”**. New York: Jhon Wiley & Sons. 333 pp.

Consejo Mexicano del Hule A.C.

2000 **“Estadísticas Básicas”**. Consejo mexicano del Hule A.C. 90 pp.

Davis S. L. y Johnson K.N.

1987 **“Forest Management”**. Third edition. McGraw-Hill. New York. 730 pp.

Dykstra D. P.

1984 **“Mathematical Programming for Natural Resource Management”**. McGraw-Hill. USA. 318 pp.

Klepac D.

1983 **“Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales”**. Segunda edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Méx. 365 pp.

Madrigal C. , Álvarez G., Rodríguez S. R.J., Rojo A. A.

1999 **“Tablas de producción para los montes españoles”**. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid. 253 pp.

Meyer H. A., Recknagel A. B., Stevenson D.D. y Bartoo R.A.

1961 **“Forest management”**. Ronald press Company. New York. 281 p.

Payandeh B y Wang Y.

1994 **“Modified site index equations for major canadian timber species”**. Forest Ecology and Management. 64: 97-101.

Ramírez M. H. y M. Zepeda B.

1994 **“Rendimientos maderables de especies forestales; actualidades en México”**. In: IV Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. SF y de FS/INIFAP. México, D.F. s/p.

Rodríguez F., C. y E. Flores A.

1989 **“Caracterización de factores básicos silvícolas para planes de manejo”**. In: Memoria del Congreso Forestal Mexicano. Toluca, México. 45 pp.

SAS Institute Inc.

1999 **“SAS/STAT™ User's Guide, Release 8th”**. Edition. Cary. N.C. USA. 73 pp.

Zepeda B., E.M

1990 **“Predicción de rendimientos maderables probables de *Pinus patula* Schiede y Deppe de Perote Ver. México”**. Tesis de Maestría. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 331 pp.

Ziede B.

1993 **“Analisys of growth ecuations”**. For. Sci. 39(3):594-616.

Ra Ximhai

Revista de Sociedad, Cultura y
Desarrollo Sustentable

Ra Ximhai

Universidad Autónoma Indígena de México

raximhai@uaim.edu.mx

ISSN: 1665-0441

México

2005

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE BRINZALES DE *Pinus montezumae* Lamb., PRODUCIDOS EN EL VIVERO SAN LUIS TLAXIALTEMALCO, DISTRITO FEDERAL

Noé Bautista Zarco; Víctor Manuel Cetina Alcalá; José Amando Gil Vera Castillo;

Cuauhtémoc Tarcicio Cervantes-Martínez

Ra Ximhai, enero-abril, año/Vol.1, Número 1

Universidad Autónoma Indígena de México

Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa

pp. 167-176

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE BRINZALES DE *Pinus montezumae* Lamb., PRODUCIDOS EN EL VIVERO SAN LUIS TLAXIALTEMALCO, DISTRITO FEDERAL

EVALUATION OF THE SEEDLINGS QUALITY OF *Pinus montezumae* Lamb., PRODUCED IN THE NURSERY SAN LUIS TLAXIALTEMALCO, DISTRITO FEDERAL

Noé Bautista-Zarco¹; Víctor Manuel Cetina-Alcalá²; José Amando Gil Vera-Castillo³; Cuauhtémoc Tarcicio Cervantes-Martínez³

¹Dirección de Aprovechamiento Forestal, SEMARNAT. Correo electrónico: noe.bautista@semarnat.gob.mx. ²Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Programa Forestal. Correo electrónico: vicmac@colpos.mx; ³Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Correo electrónico: gilvera@colpos.mx y c_cervan@chapingo.mx.

RESUMEN

La presente investigación se realizó en la Delegación Milpa Alta, Distrito Federal, con el propósito de evaluar el comportamiento en campo de la calidad morfológica de los brinzales de *Pinus montezumae* Lamb., producidos en el Vivero San Luis Tlaxialtemalco, Distrito Federal. Los tratamientos evaluados fueron 2 calidades morfológicas de brinzal (calidad alta y calidad baja), cada una de las cuales estuvo conformada por brinzales de 12 meses de edad, que fueron seleccionados aleatoriamente de la producción total del vivero, tomando como criterio único de clasificación el diámetro del tallo; es decir, que la calidad alta estuvo conformada por brinzales con diámetros mayores a 6 mm y la calidad baja por brinzales con diámetros menores a 6 mm, posteriormente dichos brinzales fueron evaluados mediante un análisis de campo. El análisis de campo se realizó después de haber establecido los brinzales en campo, en 3 sitios con características contrastantes (altitud, exposición, pendiente y humedad); siendo la sobrevivencia la variable evaluada, la cual se registró durante 12 meses, en tres diferentes periodos (heladas, secas y lluvias). Los resultados del análisis de campo indicaron que el mejor tratamiento fue la calidad alta, ya que presentó la más alta sobrevivencia en campo (83.82%). El comportamiento anterior permite señalar también que el diámetro del tallo es directamente proporcional con la sobrevivencia en campo, por lo que es un excelente criterio para evaluar la calidad del brinzal en vivero.

Palabras claves: *Pinus montezumae* Lamb., calidad de brinzal, envases rígidos de plástico y sobrevivencia.

SUMMARY

The present research was carried out in the Milpa Alta Delegation, Distrito Federal, in order to evaluate the behavior in field of the morphological quality of seedlings of *Pinus montezumae* Lamb., produced in a nursery in San Luis Tlaxialtemalco, Distrito Federal. The evaluated treatments were 2 morphologic qualities of seedlings (high and low quality), each quality sample was conformed by seedlings of 12 months old, they were selected randomly of the nursery's total production, considering as unique criterion for classifying the diameter of the stem; that is to say, the high quality was conformed by seedlings with diameters greater than 6 mm and the low quality by seedlings to diameters smaller than 6 mm, later those seedlings were evaluated by a field analysis. Which was made after the seedlings were put in the field at 3 sites with contrastants characteristics (altitude, exposition, slope and humidity); being the survival percentage the evaluated variable, which was registered during 12 months in three different periods (chill, drought and rains). The field analysis results indicated that the best treatment was the high quality seedlings, since it presented the highest field survival (83.82%). The previous behavior also allows to indicate that the diameter of the stem is directly proportional to the survival in field, reason why it is an excellent criterion to evaluate the seedlings quality in nursery.

Key words: *Pinus montezumae* Lamb., seedling quality, rigid plastic packages and survival.

INTRODUCCIÓN

Los recursos naturales con que cuenta el Distrito Federal han sufrido graves alteraciones durante los últimos años, al grado que se ha estimado que anualmente se pierde del orden de 240 hectáreas de cubierta forestal, debido principalmente a: cambio de uso del suelo, crecimiento de la mancha urbana estimado en 350 hectáreas anuales, incendios forestales, pastoreo intensivo en algunas áreas que evitan el desarrollo del renuevo en las áreas forestales, aumento de la frontera agrícola y la pérdida de suelo por diversos factores destructivos. Debido a ésto, el Gobierno del Distrito Federal ha planteado la ejecución del Proyecto de Reforestación de la Zona del Área Metropolitana de la Ciudad de México. El Proyecto cuenta para cubrir sus necesidades de planta, con un vivero de alta tecnología establecido en San Luis Tlaxialtemalco, el cual tiene una capacidad potencial de producción de 30 millones de árboles anuales (CORENADER, 2000).

El Gobierno del Distrito Federal quien ha plantado durante los últimos 15 años del orden de 80 millones de árboles con baja sobrevivencia, siendo ésta no mayor al 50%; a un año de establecida la plantación, a nivel nacional el promedio estimado está entre el 50% y el 60% (Carrasco, 2000). Las tasas de sobrevivencia están muy por debajo de las aceptadas en programas de reforestación nacionales y extranjeros; de acuerdo al Programa Nacional de Reforestación (PRONARE) se debe lograr el 60% de la sobrevivencia de las plantas establecidas. Los estándares a nivel mundial señalan que la sobrevivencia debe ser superior al 90% para plantas que reúnen el mínimo de características de calidad (Mexal y Cuevas, 1999; Prieto *et al.*, 1999; SEMARNAP, 2000).

El comportamiento anterior señala que no es la cantidad de brinzales que se producen en los viveros, ni la cantidad de brinzales que son plantados en el campo, sino que es la calidad de éstos y la relación con su crecimiento y sobrevivencia en el campo, lo que nos da señales de haber logrado un programa de reforestación exitoso.

Un concepto que cada vez adquiere mayor importancia en México ante las bajas tasas de sobrevivencia registradas, es el de calidad de los brinzales producidos en vivero. En países con tradición en el establecimiento de plantaciones forestales, dicho aspecto es

básico, ya que influye en el éxito posterior de las plantaciones (Prieto *et al.*, 1999). Para que un brinzal sea considerado de alta calidad, debe reunir las características morfológicas y fisiológicas adecuadas para sobrevivir y crecer satisfactoriamente bajo las condiciones ambientales del sitio en que será plantado (Duryea, 1985; Mexal y Landis, 1990).

La presente investigación tiene como objetivo el evaluar el comportamiento en campo de la calidad morfológica de los brinzales de *Pinus montezumae* Lamb., producidos en el Vivero San Luis Tlaxialtemalco, con la finalidad de garantizar un programa de reforestación exitoso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los brinzales de 12 meses de edad fueron evaluados mediante un análisis de campo, el cual se realizó después de haber establecido los brinzales en campo, en 3 sitios con características contrastantes (altitud, exposición, pendiente y humedad); siendo la sobrevivencia la variable evaluada, la cual se registró durante 12 meses, en tres diferentes periodos (heladas, secas y lluvias).

Material vegetal

Los brinzales de *Pinus montezumae* Lamb. utilizados durante el experimento provienen del Vivero San Luis Tlaxialtemalco, el cual se localiza en la Delegación Xochimilco, Distrito Federal; ubicado geográficamente entre las coordenadas 19° 15' 54" de latitud norte y 99° 07' 14" de longitud oeste, a una altitud de 2050 m. Cabe hacer mención que no se tuvo ninguna injerencia en el proceso de producción.

Área de estudio

El análisis de campo se realizó en la Delegación Milpa Alta, Distrito Federal: el primer sitio denominado Napanapa, se ubicó en la comunidad Santa Ana Tlacotenco, a 19° 05' 34" de latitud norte y a 98° 59' 28" de longitud oeste y a una altitud de 3368 m. El suelo es de textura franco-limoso, con 2% de pendiente y un porcentaje de agua aprovechable del 44.6%. El segundo sitio denominado Tulmiac, se ubicó en la comunidad de San Salvador Cuauhtenco, a 19° 08' 17" de latitud norte y a 99° 07' 07"

de longitud oeste y a una altitud de 3250 m. El suelo es de textura franco-arenoso, con 22% de pendiente y exposición al noreste, y con un porcentaje de agua aprovechable del 23.8%. El último sitio denominado Cuautzin, también se ubicó en la comunidad de San Salvador Cuauhtenco, a 19° 09' 18" de latitud norte y a 99° 06' 25" de longitud oeste y a una altitud de 3508 m. El suelo es de textura franco con 40% de pendiente y exposición al sureste, y con un porcentaje de agua aprovechable del 18%.

La preparación del terreno en los sitios de plantación antes mencionados, se efectuó en Julio del 2001 y consistió básicamente en la remoción manual de la vegetación existente. La plantación se llevó a cabo del 30 de Julio al 1 de Agosto del 2001 a un espaciamiento de 2.0 m X 2.0 m., respetando la distribución de los tratamientos.

Tratamientos

Los tratamientos que se evaluaron en campo fueron dos calidades de brinzal (calidad alta y calidad baja); cada una de las cuales estuvo conformada por un grupo de brinzales, los cuales previamente fueron seleccionados al azar de la producción total de *Pinus montezumae* Lamb. del vivero, tomando como criterio único de clasificación el diámetro del tallo: los brinzales de la calidad alta tuvieron diámetros mayores de 6 mm y los brinzales de la calidad baja diámetros menores de 6 mm.

Variable evaluada

La sobrevivencia fue la variable que se evaluó durante el análisis de campo, a los 236 días (periodo de heladas), 320 días (periodo de secas) y 411 días (periodo de lluvias) después de establecida la plantación. El periodo de evaluación se incluyó en el modelo como un factor de medidas repetidas (Gómez y Gómez, 1984; Littell *et al.*, 1996).

Análisis estadístico

El diseño bajo el cual se estableció el análisis de campo fue un diseño de bloques completos al azar con 2 tratamientos (calidades de brinzal), con 3 repeticiones evaluadas en 3 sitios de plantación (Napanapa, Tulmiac y Cuautzin); donde la unidad experimental estuvo conformada por 20 brinzales.

La sobrevivencia se analizó mediante el procedimiento MIXED de SAS, por ser el más adecuado para analizar conjunto de datos desbalanceados (Gómez y Gómez, 1984; Littell *et al.*, 1996) como fue el caso de esta variable. La comparación de medias de calidades de brinzal, sitios de plantación, periodos de evaluación y sus interacciones, fue con la prueba de la diferencia mínima significativa protegida por la prueba de F, utilizando las medias de mínimos cuadrados (Littell *et al.*, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sitio de plantación

El sitio de plantación denominado Napanapa fue el que registró la sobrevivencia más alta en campo (84.44 %); en cambio, los sitios de plantación Tulmiac y Cuautzin, registraron sobrevivencias de 75.10% y 75.01%, respectivamente. Una de las posibles explicaciones de que el sitio denominado Napanapa tuviera la sobrevivencia más alta, es que en dicho sitio el porcentaje de agua aprovechable fue de 44.6%, superior a los registrados por el sitio Tulmiac (23.8%) y Cuautzin (18%); y que según Burdett (1990), el estrés hídrico es la característica más común que afecta la sobrevivencia de los brinzales plantados recientemente.

Calidad de brinzal

El comportamiento en campo mostrado por las calidades de brinzal evaluadas resultó ser como se esperaba, debido a que la calidad alta con el diámetro más grande (6 mm) fue la que registró la sobrevivencia en campo más alta (Cuadro 1); coincidiendo de esta manera con lo reportado por Wakeley (1954), quien encontró que los brinzales pertenecientes a los grados morfológicos 1 y 2 sobrevivieron y crecieron mejor en el campo que el grado morfológico 3, después de 13 periodos de crecimiento en el campo; cabe mencionar que los brinzales grado 1 tuvieron diámetros mayores de 4.8 mm, los brinzales grado 2 diámetros de 3.2 a 4.8 mm y por último, los brinzales grado 3 tuvieron diámetros menores de 3.2 mm.

Cuadro 1. Comparación de medias de calidades de brinjal para sobrevivencia.

Factor	Tratamiento	Media(%)
Calidad	Alta	83.82a
	Baja	76.05b

DMS= 4.55

*Medias con la misma letra en la misma columna dentro de la misma variable son iguales con $\alpha=0.05$.

Periodo de evaluación

El periodo de heladas (236 días) tuvo la sobrevivencia más alta (82.05%) debido a que fue el periodo de evaluación más próximo al establecimiento de la plantación; en cambio, el periodo de lluvias (411 días) que fue el último periodo de evaluación fue el que registró la más baja sobrevivencia (75.88%). La sobrevivencia en campo de las calidades de brinjal durante los diferentes periodos de evaluación, se redujo en las evaluaciones posteriores; sin embargo, se mantuvo la tendencia de mayor sobrevivencia en la calidad alta, pues se obtuvieron valores superiores al 80% (Figura 1).

Un aspecto importante que se puede indicar del comportamiento anterior es que la calidad alta, es la calidad morfológica que nos garantizará un mejor desempeño en campo. Otro aspecto importante que cabe resaltar es que las bajas temperaturas y la sequía fueron los dos tipos de estrés que afectaron más la sobrevivencia de los brinzales en campo, coincidiendo con lo señalado por Grossnickle y Folk (1993), quienes indican que cuando los brinzales son expuestos a un amplio rango de condiciones ambientales dentro de los sitios de reforestación, estas condiciones pueden resultar en estrés que reducen la sobrevivencia y/o crecimiento de los brinzales recién plantados; siendo las bajas temperaturas y las condiciones de sequía los dos tipos predominantes de estrés ambiental que ocurren en los sitios de reforestación.

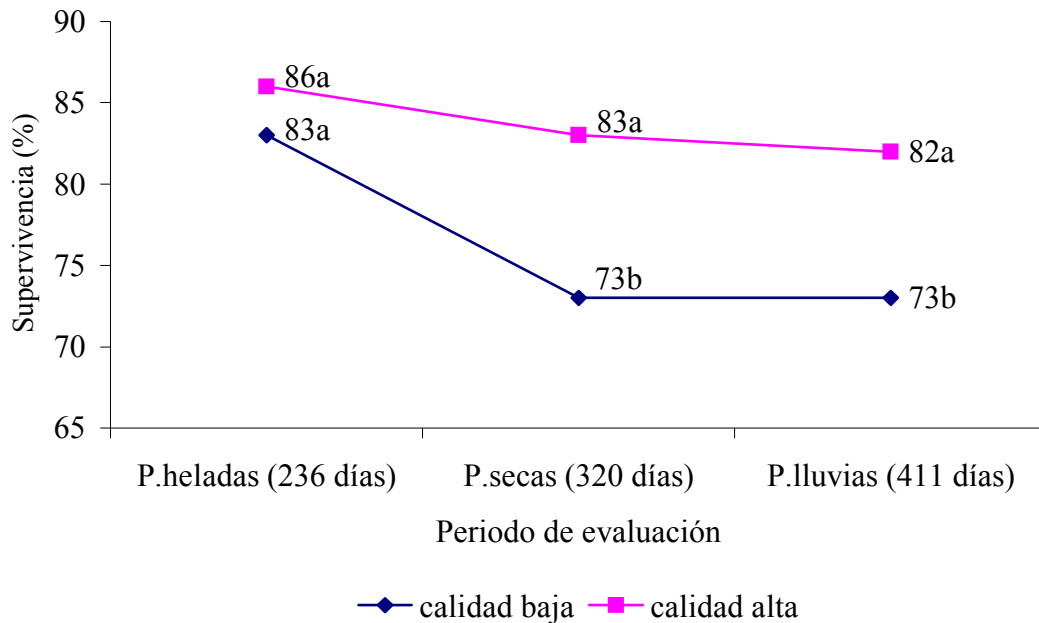


Figura 1. Supervivencia de las calidades de brinzal en los diferentes periodos de evaluación. Medias con la misma letra dentro del mismo periodo son iguales con $\alpha=0.05$, según la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS) protegida por la prueba de F (Gómez y Gómez, 1984). DMS=4.64.

El primer periodo de evaluación (periodo de heladas) mostró que en los tres sitios de plantación (Napanapa, Tulmiac y Cuautzin) la supervivencia en campo de las dos calidades de brinzal evaluadas fueron igual estadísticamente hablando, es decir que la calidad de brinzal no influyó en la supervivencia de los brinzales plantados (Figura 1). A pesar de esto, un punto que cabe señalar es que las bajas temperaturas afectaron de manera considerable la supervivencia en campo de las calidades de brinzal analizadas en los diferentes sitios de evaluación; coincidiendo de esta manera con lo reportado por Musálem (1984) y Carrillo (1986), los cuales indican que para *Pinus montezumae* Lamb. Existe un periodo en el cual la supervivencia de los brinzales en campo es afectada grandemente, este periodo inicia en Octubre y termina en Mayo del siguiente año y se debe básicamente a las bajas temperaturas y a la sequía.

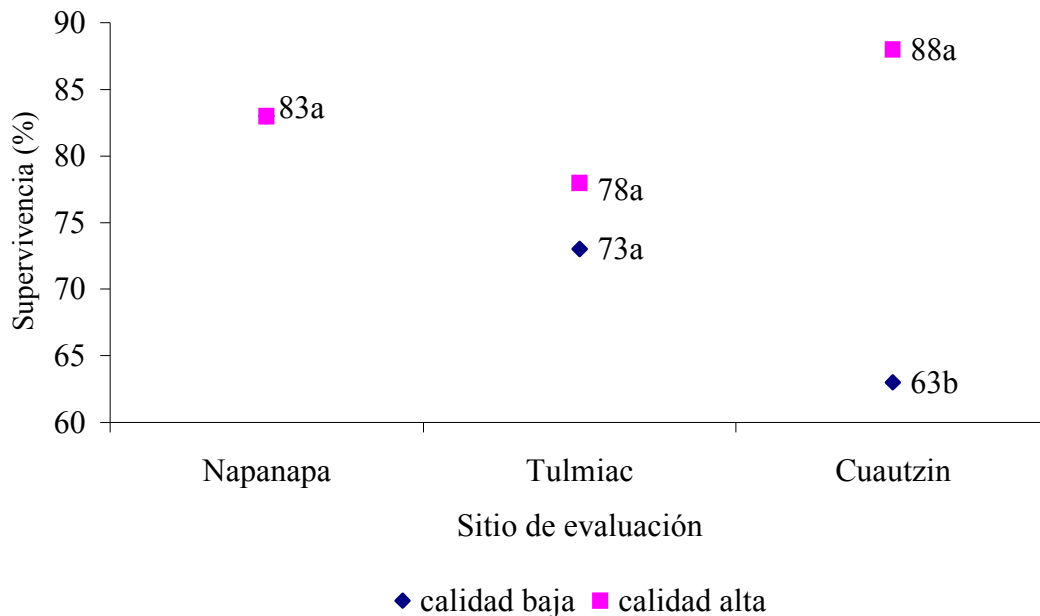


Figura 2. Comportamiento de las calidades de brinjal en los diferentes sitios de plantación durante el periodo de secas (320 días). Medias con la misma letra dentro del mismo sitio son iguales con $\alpha=0.05$, según la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS) protegida por la prueba de F (Gómez y Gómez, 1984). DMS=7.96.

La Figura 2 muestra que para el Periodo de secas (320 días), la calidad de brinjal no fue determinante en la sobrevivencia de los brinzales establecidos, en los sitios de plantación denominados Napanapa y Tulmiac, no así para el sitio de plantación denominado Cuautzin, donde la calidad alta fue la que presentó la más alta sobrevivencia en campo (88%). Una posible explicación a que en el sitio de plantación denominado Cuautzin se observaran diferencias con respecto a la sobrevivencia en campo, es que en dicho sitio se registró el porcentaje de agua aprovechable más bajo, siendo éste de 18%; y que según Burdett (1990), el estrés hídrico es la característica más común que afecta la sobrevivencia de los brinzales plantados recientemente.

La respuesta en campo de las dos calidades de brinjal durante el Periodo de lluvias (411 días) fue similar para los sitios de plantación Napanapa y Tulmiac; sin embargo, para el sitio de plantación Cuautzin, al igual que en el periodo de secas (320 días), la calidad alta siguió manteniendo la más alta sobrevivencia en campo (85%). Este comportamiento reafirma que los factores críticos a los cuales se enfrentan los brinzales

de *Pinus montezumae* Lamb., en los sitios de plantación durante un periodo de crecimiento son las bajas temperaturas y la sequía.

CONCLUSIONES

- Los sitios de plantación con menores porcentajes de agua aprovechable afectan la sobrevivencia de los brinzales plantados recientemente.
- La calidad morfológica denominada calidad alta es la calidad de brinzal que reportó la mejor sobrevivencia en campo (83.82%).
- La sobrevivencia en campo de las calidades de brinzal durante los diferentes periodos de evaluación se redujo en las evaluaciones posteriores; sin embargo, se mantuvo la tendencia de mayor sobrevivencia en la calidad alta, pues se obtuvieron valores superiores al 80%.
- El periodo crítico para la sobrevivencia de los brinzales de *Pinus montezumae* Lamb. en campo inicia en Octubre y termina en Mayo del siguiente año y se debe básicamente a las bajas temperaturas y a la sequía.
- El diámetro del tallo es un excelente criterio para evaluar la calidad de brinzal en vivero.

LITERATURA CITADA

Burdett A.N.

- 1990 **“Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock”**. Canadian Journal Forest Research 20: 415-427.

Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADER)

- 2000 www.sma.df.gob.mx/sma/corenader/prramcm/02justificación.htm

Carrasco G. J.

- 2000 **“Incentivos a la sobrevivencia de la reforestación rural”**. In: Memorias del 1er. Congreso Nacional de Reforestación. SEMARNAP-PRONARE (comps). 8-10 de Noviembre. Montecillo, Estado de México. CD-ROM.

Carrillo A. F.

- 1986 **“Época y sistema de plantación, edad de la planta y preparación del terreno en la regeneración artificial de *Pinus montezumae* Lamb., en el campo experimental Forestal San Juan Tetla, Puebla”**. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 99 pp.

Duryea M.L.

- 1985 **"Evaluating seedlings quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests"**. Forest Research Laboratory, Oregon State University. Corvallis, Oregon. USA. 143 pp.

Grossnickle S.C. y Folk R.S.

- 1993 **"Stock Quality Assessment: Forecasting Survival or Performance on a Reforestation Site"**. Tree Planter's Notes 44 (3): 113-121.

Gómez K.A. y Gómez A.A.

- 1984 **"Statistical Procedures for Agricultural Research"**. 2da. edición. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 680 pp.

Littell R.C., Milliken G.A., Stroup W.A. y Wolfinger R.D.

- 1996 **"SAS system for mixed models"**. SAS Institute Inc. Cary, N.C. 67 pp.

Mexal J.G. and Cuevas R.A

- 1999 **"Reforestation success in Mexico: Factors determinig survival and early growth in the forest of Mexico"**. Report Submitted to US Forest Service. New Mexico State University. Las Cruces, NM, USA. 18 pp.

Mexal J.G. and Landis T.D.

- 1990 **"Target Seedling Concepts: Height and Diameter"**. In: Target Seedling Symposium. Proceedings Combined Meetings of the Western Forest Nursery Associations. R Rose, *et al.* Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report RM-200. Fort Collins, Colorado, USA. p. 17-35.

Musálem M.A.

- 1984 **"Effect of enviromental factors on regeneration of *Pinus montezumae* Lamb., in a temperate forest of Mexico"**. Yale University. New Haven, Ct, USA. 244 pp.

Prieto R. J.A., Vera G. C. y Merlin B. E.

- 1999 **"Factores que influyen en la calidad de brinzales y criterios para su evaluación en vivero"**. Folleto Técnico No. 12. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Durango, Dgo. México 23 pp.

Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP)

- 2000 **"Programa Nacional de Reforestación (PRONARE)"**. Programa de Trabajo 2000. México, DF. p. 55-59.

Wakeley P. C.

- 1954 **"Planting the southern pine"**. USDA. Department of Agriculture. Washington, D. C. 233 pp.

Ra Ximhai

Revista de Sociedad, Cultura y
Desarrollo Sustentable

Ra Ximhai

Universidad Autónoma Indígena de México

raximhai@uaim.edu.mx

ISSN: 1665-0441

México

2005

PLANEACIÓN Y SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS DE ROBOTS MÓVILES EN UNA SIMULACIÓN DE UN AMBIENTE REAL

Efraín Mariscal García

Ra Ximhai, enero-abril, año/Vol.1, Número 1

Universidad Autónoma Indígena de México

Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa

pp. 177-200

PLANEACIÓN Y SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS DE ROBOTS MÓVILES EN UNA SIMULACIÓN DE UN AMBIENTE REAL

PLANNING AND FOLLOWING OF TRAJECTORIES FOR MOBILE ROBOTS IN A SIMULATION OF A REAL WORK ENVIRONMENT

Efraín Mariscal-García

Titular Académico. Universidad Autónoma Indígena de México. Los Mochis Sinaloa, México. Correo Electrónico: emariscal@uaim.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo de investigación, presenta el desarrollo de un sistema de planeación y seguimiento de trayectorias por medio de un robot móvil para transportar objetos en cooperación con otros robots en un ambiente real de trabajo y que pueda ser implementado a bajo costo, ya que no requiere de ambiente controlado, sin sacrificio de confiabilidad o precisión, para aplicación inmediata en problemas reales. Los principales objetivos de esta investigación son: construir un ambiente simulado en una computadora para llevar a cabo el desarrollo de las actividades de un robot móvil, utilizando algunas herramientas programación de Basic 7 con rutinas de lectura de pantalla en lenguaje de ensamblador. Desarrollar la planeación de la trayectoria del mismo en la cual se desplazará evadiendo obstáculos y llevándola de manera suave. Se aplicaron algoritmos para generación de espacios de trabajo, exploración del ambiente, creación del mapa y trazar trayectorias. Se encontró que los robots móviles pueden seguir una trayectoria segura sin colisiones utilizando la técnica de exploración a través de un sistema de señales en los que las marcas indicadas en el suelo hacen que el trabajo sea más preciso.

Palabras Claves: Robots móviles, ambiente simulado.

SUMMARY

This research work illustrates the development of a system for planning and following the trajectories of a group of mobile robots used for transportation of objects in an actual work environment in cooperation with other robots, being able to be implemented at low cost, without a controlled environment without sacrificing reliability nor precision with immediate application in actual situation. The main objectives of this research are: building a simulated environment in a computer to carry out the development of the activities of a mobile robot, using some programming tools of the BASIC 7 programming language with routines for screen reading in assembler language. To develop the planning of trajectory of the same robot in which it will move evading obstacles in a smooth way. Some algorithms were applied for generation of work spaces, scouting the environment, creating an area map and drawing trajectories. It was found that mobile robots are capable of following a safe trajectory without collisions by using scouting technique through a signaling system in which the marks are indicated in the floor making the movements more precise.

Key Words: Mobile robots, simulated environment.

INTRODUCCIÓN

Por siglos el ser humano ha construido máquinas que imitan las partes del cuerpo humano. El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, y transmisión de potencia a través de engranes, la tecnología en sensores han contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria.

El término "robótica" le debe gran parte de su popularidad al escritor Isaac Asimov, quien la comenzó a utilizar en una de sus obras en 1942. Éste propuso "Leyes de la Robótica", las cuales en un principio fueron sólo tres, pero luego añadió una cuarta llamada ley cero. Estas son (Pasos, 1984):

- **Ley cero:** Un robot no puede dañar a la humanidad, o a través de su inacción, permitir que se dañe a la humanidad.
- **Primera ley:** Un robot no puede dañar a un ser humano, o a través de su inacción, permitir que se dañe a un ser humano.
- **Segunda ley:** Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto cuando tales órdenes estén en contra de la primera ley.
- **Tercera ley:** Un robot debe proteger su propia existencia, siempre y cuando esta protección no entre en conflicto con la primera y la segunda ley.

Robots móviles

Son máquinas móviles, mediante rodamientos o extremidades flexibles, controladas por una inteligencia artificial, pueden pensar, decidir y aprender de su experiencia. Pueden implementar capacidades de aprendizaje y de tipo evolutivo, lo que le puede llevar a reconocer y aprender ante las situaciones que se les presenten en su interacción con el mundo que les rodea (Ollero, 2001; Hirzinger, 2001).

Limitaciones de los robots

La mayoría de los robots se utilizan en lugares cerrados y bajo ciertas normas de seguridad, aunque sigue investigando para lograr que los robots se enfrenten en lugares más difíciles, como los son las calles. Cuando se encuentran en lugares públicos, deben contar con sensores suficientes para poder detectar a una persona ya sea niño o adulto, debe de reducir velocidad para evitar algún choque.

Otra dificultad es que necesitan recargar sus baterías de manera periódica, ya que consumen una gran cantidad de energía de manera rápida debido a los trabajos forzosos que realizan. Tienen limitaciones para desplazarse en algunos ambientes tales como: escaleras, tierra, lugares robustos (entre palos y piedras), lo cual dificulta al robot a seguir con su trayectoria (Sugar y Kumar, 2001).

Planeación de trayectorias

Se reconoce a la planeación de trayectorias como la búsqueda de una sucesión de posiciones de un robot que permiten llevarlo de un estado inicial a uno final, entendiéndose como estado a la descripción de la ubicación del robot referenciada a un marco absoluto generalmente expresada por la combinación de las coordenadas cartesianas del centro del robot y la posición angular del eje principal de éste. La configuración que adquiere la trayectoria se define por la distribución de los obstáculos a lo largo de todo el ambiente de trabajo y por supuesto de la geometría del robot, así como de sus capacidades del movimiento (Yamashita *et al.*, 2003).

De esta manera, la topología del ambiente del trabajo, restringirá el espacio libre de obstáculos por el cual se pueden expresar las posibles trayectorias para alcanzar el estado final deseado. Generalmente se recurre a discretizar la presentación del espacio en el ambiente de trabajo con lo que se extrae una representación segura, es decir, se tendrá garantía que el espacio libre podrá ser ocupado por el robot sin riesgo de colisión, por lo que es necesario que tal discretización se haga en relación a las características geométricas tanto del robot como de los obstáculos (Sugar y Kumar, 2001).

La planeación de trayectorias puede realizarse de una forma dinámica, considerando la posición actual del vehículo y los puntos intermedios de paso definidos en la planeación de la ruta. La definición de la trayectoria debe tener en cuenta las características cinemáticas del vehículo, por ejemplo: en vehículos con rueda y tracción convencional, interesa definir trayectorias de curvatura continua que pueden ejecutarse con el menor tiempo posible (Sugar y Kumar, 2001).

Una vez realizada la planificación de la trayectoria, es necesario planificar movimientos concretos y controlarlos para mantener al vehículo en la trayectoria planificada. Así se plantea el problema para el seguimiento de caminos, que para vehículos con ruedas se concreta de determinar el ángulo de dirección teniendo en cuenta la posición y orientación actual del vehículo con respecto a la trayectoria que debe seguir.

Robots como agentes cooperativos

Los robots cooperativos son un grupo de robots capaces de planear cooperativamente movimientos de objetos, cada robot sabe cooperar con los demás cuando éstos requieran apoyo de él, así como pedir la cooperación de los demás cuando sea requerida. Un robot puede estar atendiendo diferentes procesos o lógicamente en uno mismo. Un robot distribuido puede planear o actuar, pero también puede responder a otros robots que soliciten ayuda (Smith, 1981).

El proceso de distribución se enfoca principalmente al problema de coordinar a un grupo de robots que realizan un conjunto de tareas afines y solucionan problemas en forma conjunta y cooperativamente; identificando aquellos subproblemas que cada uno puede resolver, solucionándolo concurrentemente e integrando sus resultados parciales para obtener una solución global del problema (Smith, 1981).

Al distribuir a los robots se distribuye también el control y las responsabilidades de cada uno en un problema. Cada robot debe conocer cuáles son sus propias capacidades y razonar acerca de las interacciones, creencias y planes de otros robots. Debido a ello, para crear sistemas que cuenten con inteligencia se deben tomar en cuenta aspectos importantes como: las acciones de los robots deben ser coherentes a las metas globales

del grupo, así como el control de la capacidad de transmisión y recepción de mensajes que los robots deben poseer para una eficiente cooperación.

Los principales objetivos de esta investigación fueron construir un ambiente simulado en una computadora para llevar a cabo el desarrollo de las actividades de un robot móvil, utilizando algunas herramientas programación de Basic 7 con rutinas de lectura de pantalla en lenguaje de ensamblador. Desarrollar la planeación de la trayectoria y su desplazamiento evadiendo obstáculos y llevándola de manera suave.

MATERIALES Y MÉTODOS

Etapas de trabajo de acción de los robots cooperantes

Para el mejor manejo de la investigación fue necesario dividir las tareas en dos puntos importantes:

- Formar equipos y asignar funciones.
- Trazar trayectorias.

Formar equipos y asignar funciones

Para el desarrollo de las etapas de trabajo antes mencionadas, se recopilaron datos tales como: cantidad de robots, objetos posibles y las distancias entre ambos elementos. El objetivo de esta etapa es detectar el objeto más cercano, por lo menos a dos robots.

Trazar trayectorias

Nuestro espacio de trabajo se dividió en secciones por celdas, en donde los robots scout son los que se encargan de explorar todo el espacio de trabajo y poder encontrar las posibles trayectorias. Teniendo ya calculados todos los caminos posibles tras el proceso de inspección de los robots scout, un algoritmo encontró un camino óptimo y más seguro, en este caso; el más corto de entre dos puntos. La distancia entre los robots y los objetos es de gran importancia ya que es la que determina la jerarquización de los robots. Por lo tanto, el robot que se encuentre más cerca de un objeto toma el mando de

liderazgo, el que sigue se considera el de carga y el último de la jerarquía el robot explorador (scout).

Cuando los scout trazan las posibles trayectorias, le envían el mapa del ambiente con las trayectorias trazadas al líder, cuando ya se tiene conocimiento de la mejor trayectoria se opta por seguir la línea de la trayectoria, mientras que el de carga va siguiendo al líder. Si la trayectoria trazada se bloquea ya sea que se mueven o ponen objetos dentro de la ruta que había sido trazada por el robot explorador; inmediatamente el líder le envía información al scout de que la trayectoria trazada ha sido bloqueada, inmediatamente el explorador vuelve hacer un escaneo del área para encontrar otra trayectoria posible y que el robot líder pueda llegar a su meta junto con el robot cargador.

Algoritmos para la planeación de trayectorias

Planear la trayectoria ha sido uno de los elementos más importantes para los robots móviles, ya que estos robots tienden a moverse por lugares desconocidos y a su vez evadir obstáculos de manera precisa. La utilización de robots-vehículos ha tenido lugar para realizar ciertos trabajos peligrosos para la vida humana como por ejemplo: desactivación de bombas, exploración en túneles, en carreras aeroespaciales y transporte de material peligroso.

La generación de trayectorias en este tipo de robots son ejecutados por poderosos programas que manejan y manipulan datos necesarios en los cuales son representados por un mapa virtual de su medio (posiciones del robot y lugares con obstáculos).

Descripción de la planeación de trayectorias

Dado un robot con su posición y orientación inicial, así como la descripción del espacio de trabajo, debemos encontrar una trayectoria para así poder obtener una posición de orientación final, pero sin embargo cuando ponemos obstáculos en el espacio de trabajo del robot, obliga al robot a encontrar dicha trayectoria desplazándose y evitando cualquier colisión con obstáculos.

Por lo cual, podemos resolver el problema de la planeación de trayectorias libres de colisiones (choque) explorando el ambiente de trabajo y mapeando los obstáculos que

se encuentren alrededor del robot, dentro de un espacio cartesiano, para después crear los modelos de los objetos. Uno de los problemas iniciales sería hacer que un robot móvil recuerde un camino desde la entrada de un cierto lugar hasta la salida y que ese camino sea el más adecuado para seguir la trayectoria planeada. Este proceso para planear la generación de la trayectoria se subdivide en tres algoritmos que serían creados para la solución de problemas específicos y puntuales. De este modo los algoritmos a realizar serían los siguientes:

- Un algoritmo que controlará la inspección de la trayectoria hecha por el robot y ya teniendo el conocimiento del entorno, podrá generar puntos libres de obstáculos que servirán para los otros algoritmos.
- Otro algoritmo para que el robot móvil siga una trayectoria calculada.
- Un tercer algoritmo para generar la trayectoria.

Sabemos que para el funcionamiento de los algoritmos es necesario detallar parámetros de entrada ya que necesitaremos conocer el ambiente para que los algoritmos funcionen correctamente para lo cual tenemos los siguientes puntos:

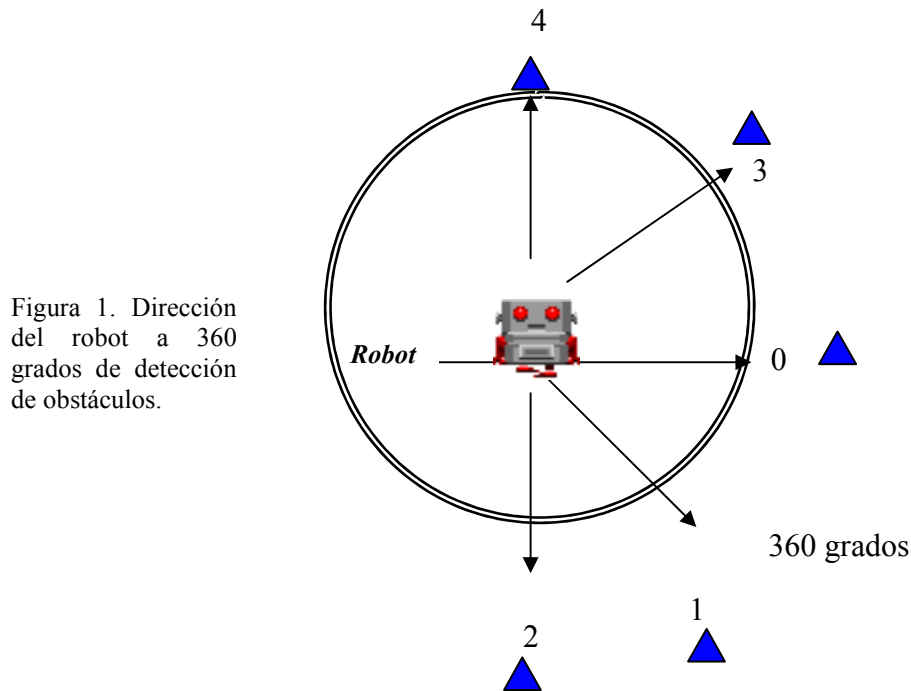
- Coordenadas X y Y del robot representado en un mapa cartesiano.
- Detección de obstáculos (los obstáculos que se van a evadir).
- Medidas físicas del espacio de trabajo en donde se va a mover el robot.

Teniendo claros los datos que necesitaremos del entorno del espacio de trabajo, se explica cada uno de los siguientes algoritmos:

Algoritmo de inspección

Como se ha anticipado, este algoritmo proporciona los puntos libres de obstáculos que necesitarán los otros algoritmos para realizar su tarea. Este algoritmo controla al robot en la tarea de inspección del espacio de trabajo, en donde el robot construye un mapa virtual de las paredes del lugar teniéndolo memorizado para saber qué alternativas posibles tiene para ir desde un punto inicial a un punto final. El robot detecta la

presencia o la ausencia de obstáculos en las direcciones norte, noreste, noroeste, este y oeste, referenciada al propio robot (Figura 1).



Con estas posiciones para la detección de obstáculos, el robot trabajará para detectar y memorizar alternativas para luego ejecutarlas si es necesario. El sistema de detección de obstáculos debe de tener una distancia de detección tal que sea capaz de visualizar las paredes del lugar y en esos casos no existen alternativas posibles, pero ha de poder ver huecos en las paredes que serían alternativas para llegar a la salida del espacio de trabajo, para poder ver los huecos. La distancia de detección será de un valor que dependa de la dimensión del lugar, concretamente el ancho del pasillo del laberinto, para que la ausencia de un obstáculo signifique invariablemente la presencia de un hueco en la pared, es decir una alternativa, y la detección de obstáculos signifique una pared sólida donde no existe salida por ahí. Veamos las Figuras 2 y 3 en donde se muestran los valores límites de la distancia de detección de obstáculos.

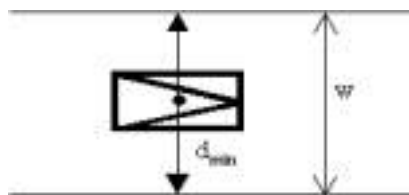


Figura 2. Valor mínimo de la distancia de detección de obstáculos.

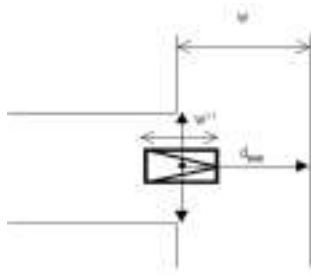
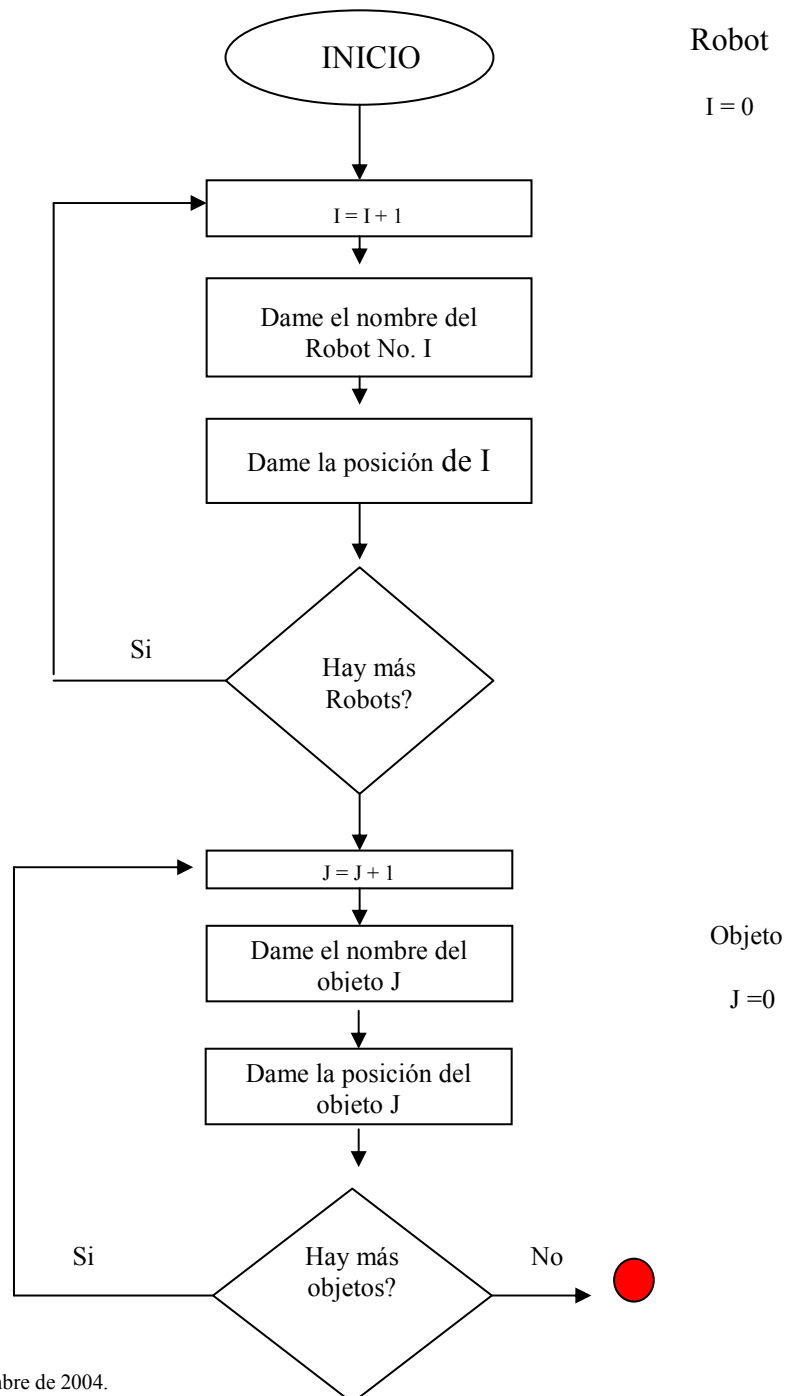


Figura 3. Valor máximo de la distancia de detección de obstáculos.

La Figura 4, muestra el diagrama de flujo del algoritmo, para encontrar en el espacio de trabajo cuántos robots y objetos activos se encuentran disponibles. La función de este algoritmo es encontrar todos los robots y los tipos de objetos con sus posiciones dadas en las coordenadas en X y Y del mapa cartesiano.

Figura 4. Diagrama de selección de objetos y robots en el mapa cartesiano.



La Figura 5 muestra el diagrama de flujo del algoritmo para calcular la distancia de los robots entre los objetos, para saber cual es el X robot más cercano de Y objeto y así empezar a calcular la jerarquización de cada uno de los robots.

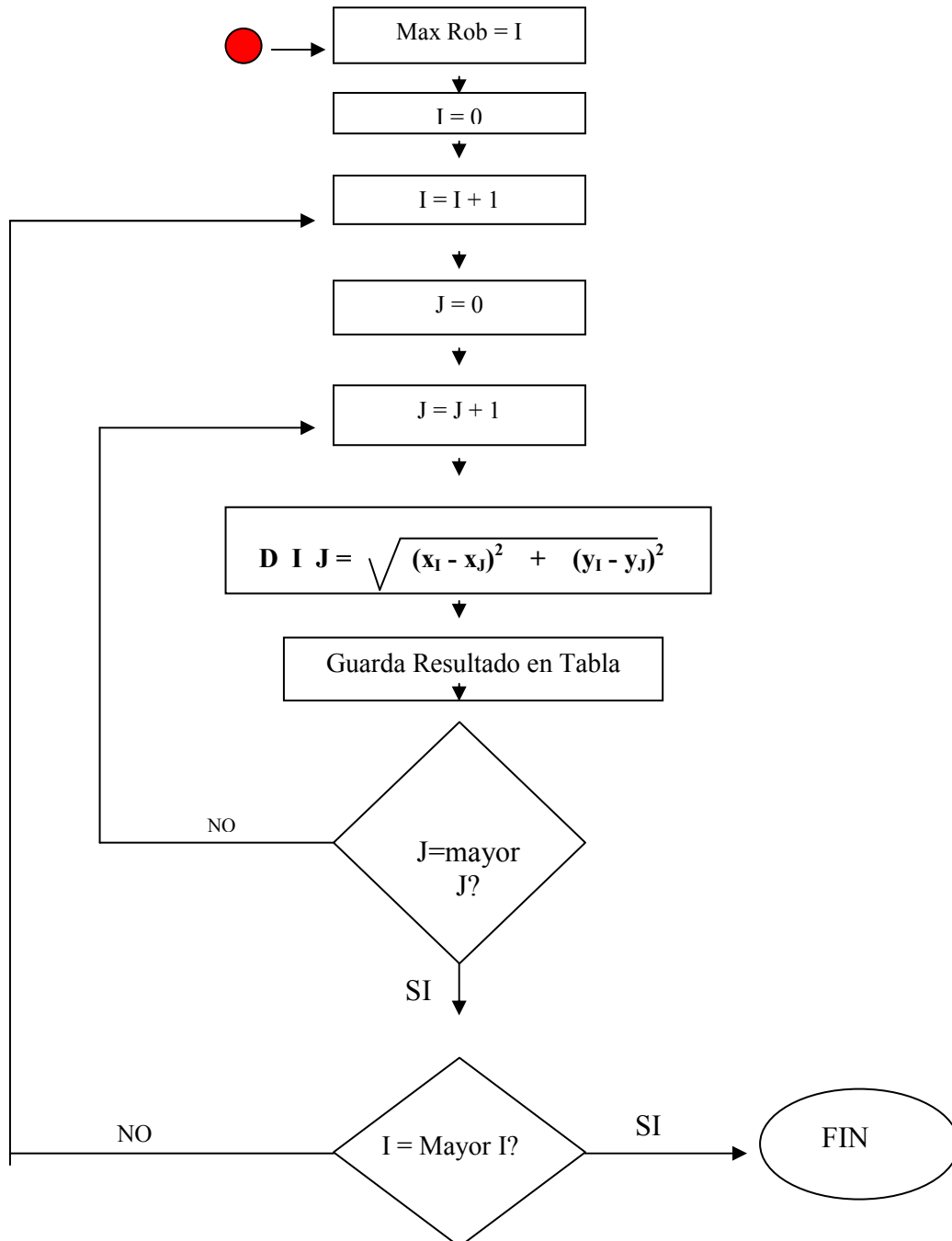


Figura 5. Diagrama de flujo para calcular distancias.

Algoritmo de asignación de jerarquización de miembros de equipo

Una constante indica el número de renglones en la tabla OD (orden por distancia) en donde se utilizaron cuatro variables temporales (Cuadro 1) la cual describimos a continuación:

- La primera variable lleva el valor del renglón de la tabla OD actual.
- La segunda variable, lleva el rango de la asignación siguiente.
- La tercera variable lleva el número o el nombre del robot al que se le asignará la función.
- La cuarta variable contienen el número o el nombre del robot que se encuentre en el renglón de la tabla OD que se está analizando.

Cuadro 1. Variables y constantes del equipo de trabajo (robots)

Renglones de tabla	=	constante
Renglón actual	=	variable 1
Asignación	=	variable 2
Robot anterior	=	variable 3
Robot actual	=	variable 4

Para el mejor manejo de conceptos técnicos de las palabras a utilizar, fue necesario crear abreviaturas para utilizarlas en los diagramas de flujo de los algoritmos.

- RT = Renglones de tabla
- RA = Renglón actual
- ASG = Asignación
- RobAnt = Robot anterior
- RobActual = Robot actual
- OD = Orden por distancia

Para el funcionamiento de los robots fue necesario crear un diagrama de flujo del algoritmo de asignación de funciones el que se va a encargar de decidir la jerarquización (liderazgo, carga y exploración) (Figura 6).

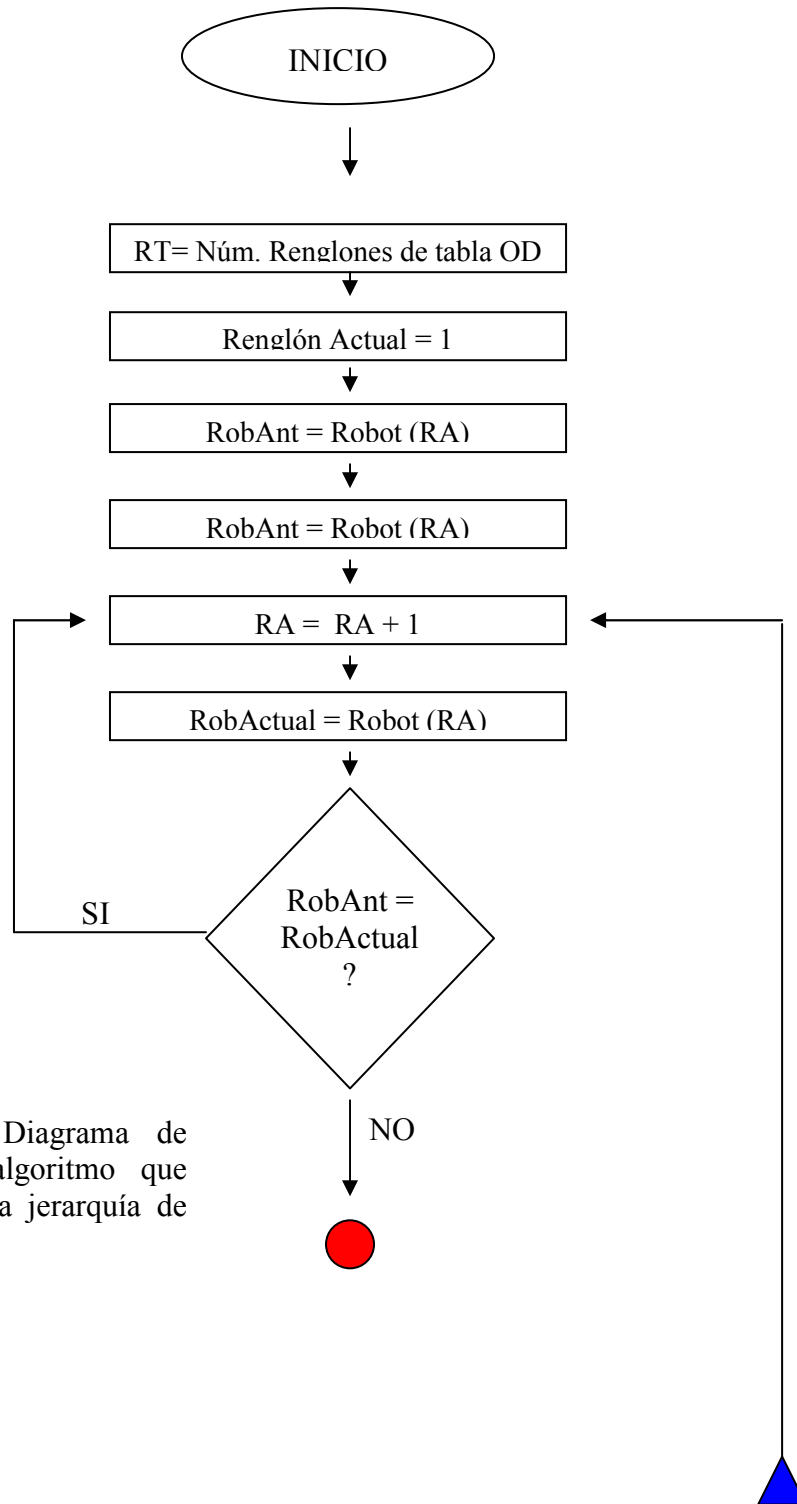
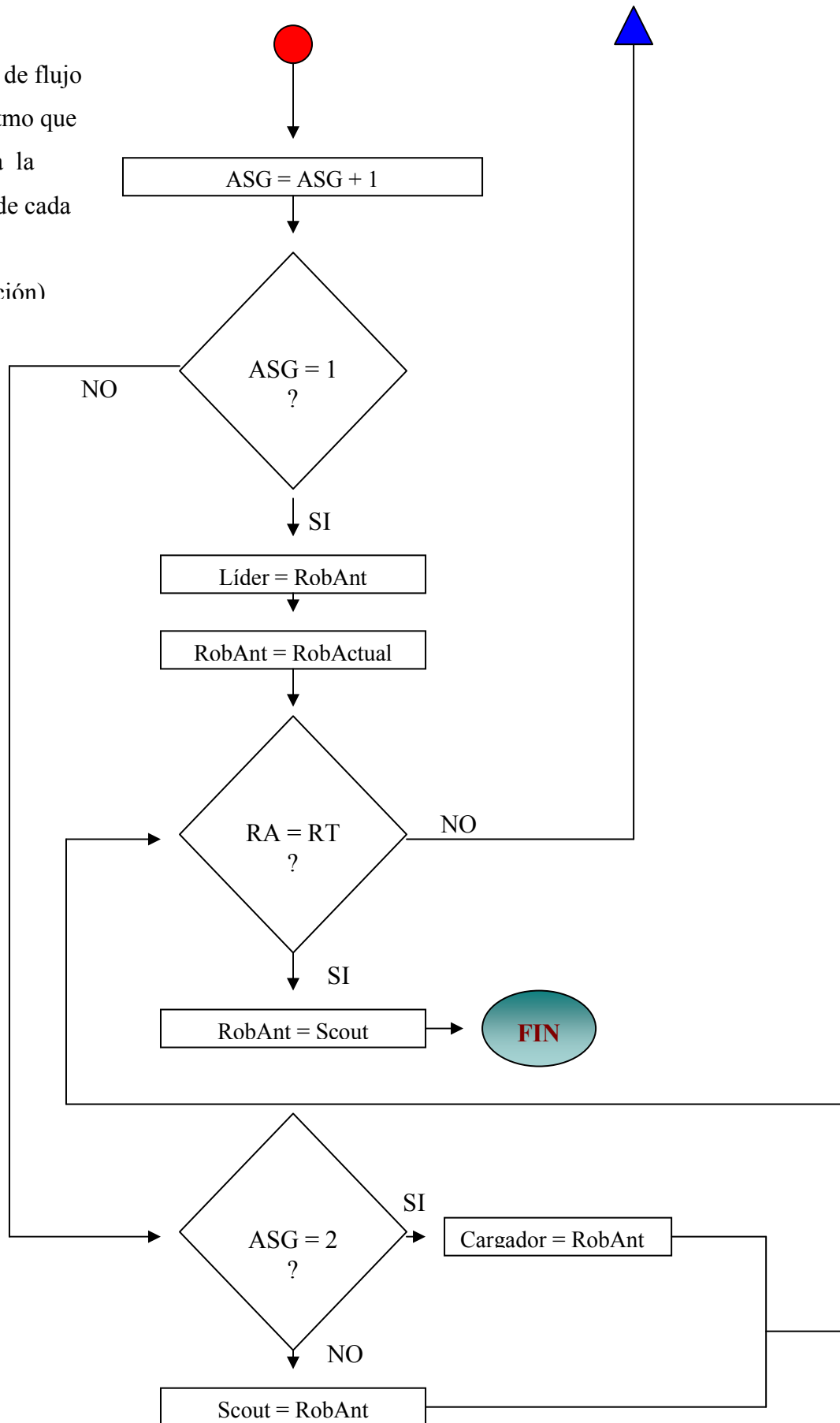


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo que selecciona la jerarquía de cada robot.

Figura 6.
Diagrama de flujo
del algoritmo que
selecciona la
jerarquía de cada
robot
(continuación)



Analizando el algoritmo propuesto anterior, se realizó un análisis del diagrama de flujo para la asignación de jerarquías de cada robot (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis del algoritmo de jerarquización

1. RT = 9, RA = 1, RobAnt = 2
2. RA = 2, RobActual = 3, ASG = 1, Robot 2 = Líder, RobAnt = 3
3. RA = 3, RobActual = 3
4. RA = 4, RobActual = 3
5. RA = 5, RobActual = 2, ASG = 2, Robot 3=Cargador, RobAnt = 2
6. RA = 6, RobActual = 2
7. RA = 7, RobActual = 1, ASG = 3, Robot 2 = Scout, RobAnt = 1
8. RA = 8, RobActual = 1
9. RA = 9

Para lograr que los robots interactúen en un espacio de trabajo, fue necesario utilizar el mapa cartesiano para representar las coordenadas de X y Y de los robots y los objetos.

Robots	X	Y
A	3	4
B	6	8
C	4	5
D	7	2
E	6	1

La siguiente fórmula sirve para sacar la distancia de los objetos J hacia los robots I para después vaciarlos en una tabla y conocer cuál es el nivel de mando de cada robot (Cuadro 3).

$$D \text{ I J} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

En el Cuadro 3 se muestra claramente, que al aplicar la fórmula de la distancia para encontrar la jerarquización de los robots, el robot B está más cerca del objeto B; eso quiere decir que el robot B pasa a ser el líder del grupo, el C pasa a ser el cargador y por último el A es el scout.

Cuadro 3. Tabla de la distancia de los robots hacia los objetos.

Robots	Objetos	Distancia
A		
	B	6
	r	8
B		
	B	2
	r	9
C		
	B	4

Algoritmo de seguimiento de una trayectoria

Para este algoritmo, la única entrada necesaria es la trayectoria a seguir, cosa que ya nos ha de haber sido proporcionada con la ayuda de los anteriores algoritmos, su función básica es guiar al robot desde la entrada hasta la salida del camino a través de la trayectoria dada. En la Figura 7 se muestran las posiciones actuales para el seguimiento de la trayectoria.

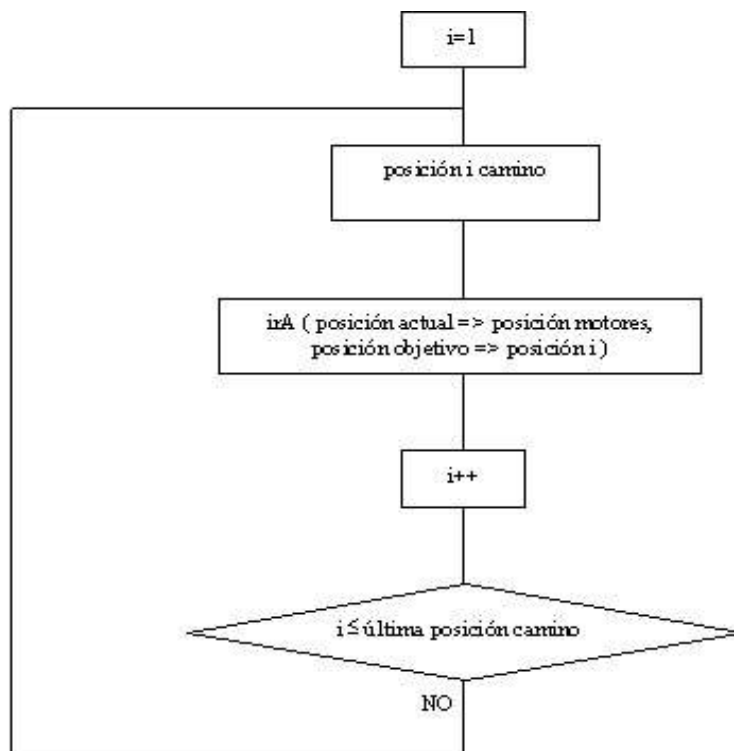


Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo que realiza las posiciones posibles para el seguimiento de la trayectoria del robot

En lo siguiente, el robot líder se encargará de generar las trayectorias a partir de un mapa escalado que es proporcionado por los robots scout. Este mapa debe contener todos los obstáculos con dimensiones y ubicaciones lo más apegada a la realidad, ya que de esto dependerá la exactitud del movimiento emprendido a posteriori por el robot. El sistema está compuesto por una serie de rutinas programadas en lenguaje Basic, las cuales tienen entre sus varios objetivos: la generación del mapa del ambiente y la ejecución de la trayectoria.

La generación del mapa consta de una serie de rutinas que permiten el diseño del propio mapa en un ambiente gráfico con dimensiones reales, en donde el usuario introduce los obstáculos por posicionamiento del cursor en el área deseada. Se tiene la facilidad de salvar y guardar los mapas; lo que permite emplear al robot en diversos ambientes. Se cuenta además, con una opción de conversión del mapa a espacio de trabajo, la cual se encargará de expandir todos los obstáculos en las dimensiones del robot, con la finalidad de que el mapa final sea adecuado y confiable para poder buscar una trayectoria. De esta manera, el mapa es discretizado a las dimensiones del robot y se representan por una matriz de unos y ceros, donde los ceros significan espacio libre y los unos obstáculos.

Una vez que los robots scout hayan explorado el ambiente o espacio de trabajo, es necesario crear un punto de inicio y el punto en donde se quiere que llegue el robot. Con estos datos, el robot líder tendrá que buscar, sin instrucciones externas adicionales, generar una trayectoria que sea óptima en distancia.

Después de que los robots scout hayan explorado el ambiente de trabajo, los robots llegan a conocer la zona sobre la cual se van a mover, es decir, los algoritmos para la planeación de trayectorias toman como entrada un mapa sobre el cual debe navegar el robot y entregan como salida una secuencia de movimientos, que se encadenan como una trayectoria para el robot buscando generalmente llevarlo del punto actual a un punto diferente definido como meta.

El sistema de control del robot consiste en 3 elementos, integrados en una representación homogénea de conductas:

- Navegación básica: consiste en evitar obstáculos y seguimiento de bordes.
- Detección de marcas: categorización del mundo identificado.
- Construcción y actualización del mapa y la planeación de caminos.

Descripción del espacio de trabajo

Para la creación de un ambiente de trabajo simulado como un universo para la realización de tareas, éste debe contar con la siguiente descripción:

- Que los robots y los objetos cuenten con alguna geometría, ya que son los elementos esenciales y más importantes para la creación del ambiente o modelo.
- La forma física de los objetos tienen una tarea importante de representación y así poder manipularlos a nuestra conveniencia.
- En las características de los robots es necesario considerar los alcances y limitaciones tales como la manipulación de la articulación, así como la aceleración y capacidad sensorial.

En las diferentes áreas de la robótica, la geometría juega un papel muy importante, por ejemplo: para encontrar una trayectoria segura sin choque (colisión) para el robot, es claro que necesitamos crear un modelo que cuente con las formas y dimensiones totales de los objetos con los que se van a trabajar y sobre todo las restricciones mecánicas del robot.

Entonces, para alcanzar el objetivo de la robótica, es necesario crear una forma representativa de todo el conocimiento sobre el espacio o universo real, su geometría, leyes físicas y sus errores. La geometría es importante, pero la existencia de las fuerzas e incertidumbres hacen que los planteamientos de las acciones no sean claramente exactos. El espacio de trabajo de los robots es representado por una forma geométrica rectangular, si bien es cierto que raramente el espacio de trabajo tiene forma rectangular, también es verdad que raramente se ocupan todas las configuraciones posibles de las que pudiera alcanzar un robot.

Los obstáculos que se encuentren dentro del área de trabajo de los robots son modelados por formas geométricas, ya que el objetivo es el cálculo de la planeación de la trayectoria evitando obstáculo.

El área de trabajo puede definirse de dos maneras:

- Área de trabajo fijo
- Área de trabajo dinámico

En el área de trabajo fijo o estático, las posiciones de los objetos en el área son predeterminados.

En el caso del área de trabajo dinámico las posiciones de los objetos son aleatorias. El área de trabajo es representado, por rectángulos y los objetos por imágenes reales.

Algoritmo de navegación básica

Este algoritmo se diseñó para facilitar el reconocimiento de marcas y la construcción de los mapas. Su tarea principal es mantener al robot en movimiento constante de manera segura en un ambiente gráfico estático (sin alteraciones), evitando colisiones con obstáculos y con personas. La estrategia de navegación consiste en: evitar las colisiones entre el robot y los obstáculos, y mantener al robot a una distancia mínima de los objetos. Esta conducta es útil ya que la precisión de los sonares es maximizada en la proximidad de objetos detectables, donde el robot puede obtener información sobre el ambiente.

Programación Basic

Basic es la manera más rápida y fácil de crear aplicaciones. Proporciona un conjunto completo de herramientas que simplifican el desarrollo rápido de aplicaciones. Cuenta con reglas de manejo de gráfico propios en ensamblador que permite tomar control absoluto del proceso

Creación de la interfase del usuario

La interfase de usuario es quizás la parte más importante de una aplicación; ciertamente, es la más visible. Para los usuarios, la interfase es la aplicación; seguramente a ellos no les interesa el código que se ejecuta detrás. Independientemente del tiempo y el esfuerzo que haya empleado en la escritura y optimización del código, la facilidad de uso de su aplicación depende de la interfase.

Cuando se diseña una aplicación hay que tomar muchas decisiones relacionadas con la interfase. ¿Debe usar el estilo de documento único o el de documentos múltiples? ¿cuántos formularios diferentes necesitará? ¿qué comandos incluirá en los menús? ¿Usará barras de herramientas para duplicar funciones de los menús? ¿cómo va a hacer los cuadros de diálogo que interactúan con el usuario? ¿qué nivel de asistencia necesita proporcionar?

Antes de empezar a diseñar la interfase del usuario, se tuvo que pensar en el propósito de la aplicación. El diseño de una aplicación principal de uso constante debe ser diferente del de una que sólo se utiliza ocasionalmente, durante breves periodos de tiempo. Una aplicación cuyo propósito fundamental sea de presentar información tiene unos requisitos distintos que otra que se utilice para obtener información.

Programación de objetos

Los objetos son el fundamento de la programación en Basic. Los formularios y los controles son objetos. Las bases de datos son objetos. Hay objetos por todas partes.

Descripción del simulador

Como se dijo anteriormente, este simulador cuenta con un ambiente gráfico muy amigable para que el usuario final pueda manejarlo sin ningún problema. Las características con las que debe contar este simulador son: especificar la ubicación y la

distancia que tienen los robots hacia los objetos, también cuenta con un espacio en donde son presentadas las simulaciones llevadas a cabo al aplicar algoritmos de trabajo.

El simulador está formado por dos etapas: la primera etapa es que al iniciar el programa se debe especificar el tipo de ambiente en donde queramos trabajar, ya sea un almacén, oficina o el campo de una escuela.

En la segunda etapa se asignan las tres jerarquías de los robots que se autojerarquizan dependiendo de que objeto se encuentre cerca de cada robot, por ejemplo: se inicia el sistema, busca las distancias de los objetos entre los robots, el robot que se encuentre más cerca de x objeto toma el mando de liderazgo, el otro robot seguido del líder toma el mando de cargador, y el último se caracteriza como scout.

Cuando ya se tienen las jerarquías, el sistema automáticamente indica a los scout hacer una exploración de zona, ya que el espacio del simulador está diseñado por celdas para la mejor búsqueda de una trayectoria óptima, en donde los scout son esparcidos por cada una de las celdas.

Este programa cuenta con una caja de objetos como: sillas, bancos, sofás, cestos de basura, cajas, etc. Estos objetos son representados en el espacio de trabajo del simulador en donde los robots interactúan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como lo hemos ido mencionando anteriormente, al aplicar los algoritmos de exploración, trazo de la trayectoria y seguimiento, los resultados de los algoritmos desarrollados son los siguientes:

En la Figura 8, los robots scout escanean el área de trabajo, después de que terminan de explorar el ambiente, cargan la información del mapa y lo convierten en una imagen digital para después cargarlo a la memoria del robot líder.

Primeramente presentamos la imagen original que fue construida dentro del mismo programa, el color de la gráfica de la pantalla nos muestra la originalidad de la imagen antes de que sea explorada por los robots scout.

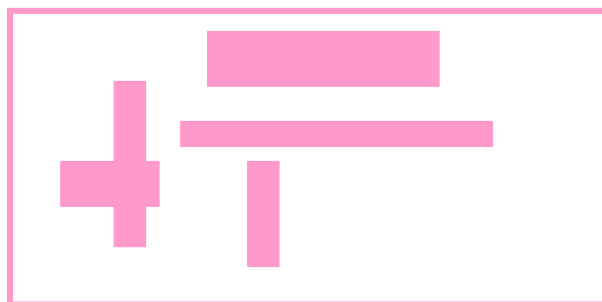


Figura 8. Representación de la imagen original

En la Figura 9, vemos como los scout empiezan a escasear el área de trabajo aplicando el algoritmo de exploración.

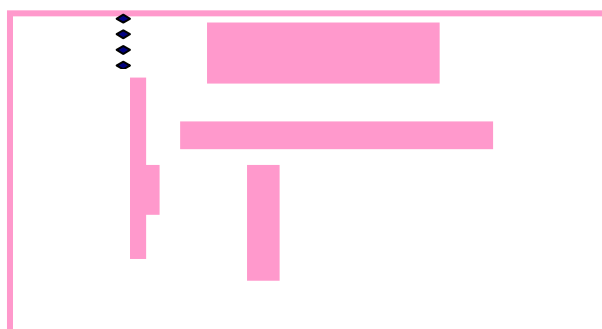


Figura 9. Scout explorando el ambiente de trabajo

Terminando el escaneo del espacio de trabajo por los robots scout, el sistema crea el mapa digital y muestra las posibles trayectorias que los robots van a seguir, después de tener los datos exactos del espacio de trabajo, se cargan a la memoria del robot. Siguiendo el ordenamiento de los algoritmos, el sistema inmediatamente crea el punto inicial y el final, ya teniendo estos dos puntos para trazar la trayectoria, el robot primeramente traza una línea recta de los puntos A y B, que es la más razonable a trazar, pero si se tienen objetos obstruyendo la trayectoria, el robot empieza a trazar otra línea recta de los puntos A y B evadiendo los obstáculos, tal es así que hace varios intentos por buscar la trayectoria más precisa hasta llegar a su punto final. En las

Figuras 10 y 11 vemos claramente los puntos trazados de la trayectoria del robot realizando 7 intentos en la cual evade los obstáculos hasta llegar a la meta.

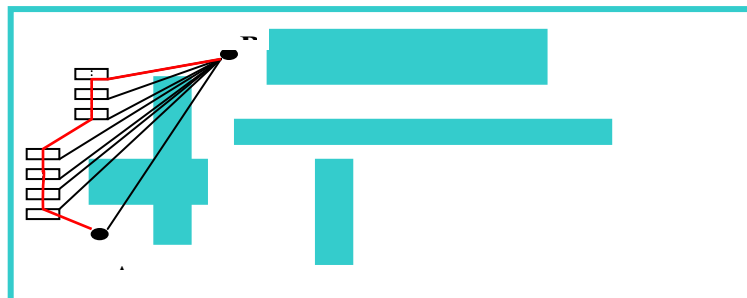


Figura 10. Trayectoria trazada por el robot

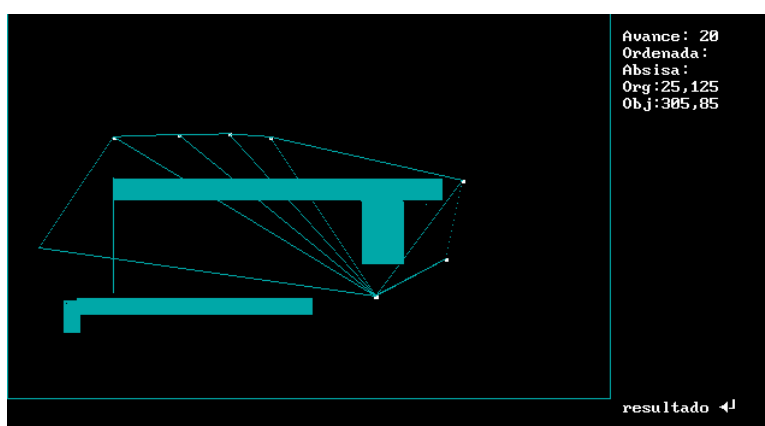


Figura 11. Posibles trayectorias trazadas por el robot

En el trazo de trayectoria de los robots, se pueden encontrar con un error de trazo y seguimiento de la línea creada, en lo cual se muestran algunos resultados en donde el robot realizó un primer intento del trazo de la trayectoria, ya que no pudo continuar su seguimiento debido a que no encontró su camino por la obstrucción de un gran obstáculo. Inmediatamente busca otro camino para llegar a su meta.

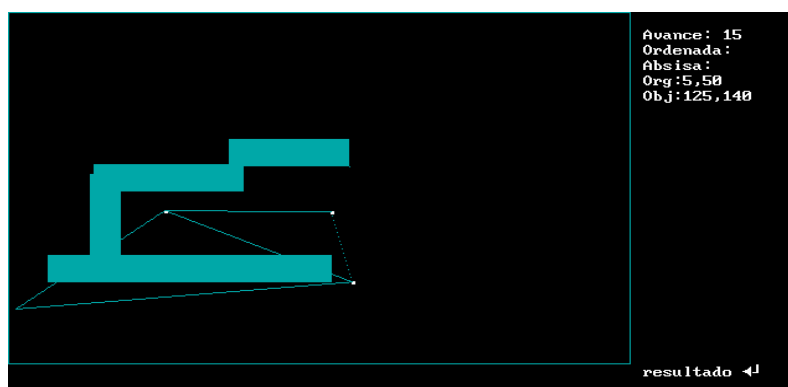


Figura 12. Seguimiento de la trayectoria encontrada después de dos intentos

Continuando con los análisis de los resultados del seguimiento de trayectorias, mostramos el Cuadro 5 donde se muestran claramente los resultados finales del robot al seguir diferentes trayectorias trazadas.

Cuadro 5. Resultados finales de las trayectorias

Origen		Destino		Pendiente	Sentido	Intentos	Croquis
X	Y	X	Y				
25	125	305	85	-0.14	sent 1	8	UAIM
185	225	185	25	1	sent 1	3	UAIM
25	45	265	125	0.33	sent 1	4	UAIM
5	61	159	201	0.9	sent 1	3	UAIM2
33	131	257	145	0.06	sent 1	6	UAIM2
5	50	125	140	0.75	sent 1	3	UAIM2
35	80	400	155	0.2	sent 1	11	PRU1
110	75	376	250	0.65	sent 1	4	COMPUTO

CONCLUSIONES

La planeación de trayectorias, en espacios representados en diferentes dimensiones, es una área ampliamente estudiada ya que demostramos que con poca programación y en lenguajes de bajo nivel podemos implementar una solución confiable al problema de trazo y seguimiento de trayectorias para uso en desplazamiento de robots, lo que significa una reducción de los costos inherentes ya que esto es uno de los principales problemas en la realización de trabajos robotizados. Cuando el líder tiene creado el mapa del lugar, va trazando una línea en el piso en donde el cargador va siguiendo la dirección que el líder le indica hasta llegar a su punto final.

Uno de los propósitos de este trabajo era comprobar que los algoritmos propuestos cumplieran con la función específica en la planeación de las trayectorias. Como se esperaba, al incrementar el número de obstáculos también aumentaba el número de robots, lo cual podría considerarse como una desventaja, ya que las alternativas a buscar una trayectoria aumentarían de la misma manera.

Por lo anterior, es importante decir, que aunque en esta investigación no se realizó un estudio más detallado para la creación de un mapa, se planteó una forma para crear el mapa, de esta manera el robot podría navegar y construir el mapa de su ambiente de trabajo utilizando el algoritmo aquí propuesto. Una vez que se conoce el mapa del

ambiente es posible marcar la ruta completa y en casos no previstos como: (objetos en movimientos y objetos que han sido cambiados de lugar) utilizar recursivamente estas reglas de navegación. La combinación de estos dos métodos de creación de mapas y marcado de la meta; nos permite reducir la posibilidad de que caiga en lugares engañosos como los son callejones, pasillos, etc. Estamos lejos de crear una verdadera inteligencia, pero tomando en cuenta que se han hecho avances importantes que permiten perfeccionar el funcionamiento de pocas máquinas como lo son los robots móviles, y que son de amplia y evidente aplicación.

LITERATURA CITADA

Ollero Baturone Aníbal

2001 **“Robótica, manipuladores y robots móviles”**. Editorial Alfaomega, España, 447 pp.

Hirzinger Gerd

2001 **“Institute of Robotics and Mechatronics”**. *Wessling Germany*. 210 pp.

Pasos Sierra Juan

1984 **“Inteligencia Artificial”**. Facultad de Informática, Madrid España, pp. 132.

Smith Reid G.

1981 **“Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving”**. IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics. Vol. SMC-11, No.1, January.

Sugar T. G. y V. Kumar

2001 **“Control of cooperating mobile manipulators”**. IEEE Trans. Robot. Automat. Vol. 18, p. 3373-3378.

Yamashita A., Arai, T. Jun Ota y Asama H.

2003 **“Motion planning of multiple mobile robots for Cooperative manipulation and transportation”**. Robotics and Automation, IEEE Transactionson, Volume: 19 Issue: 2: 223 -237.