

ESTUDIO EPIDOMÉTRICO DE LA REGENERACIÓN DE *Pinus hartwegii* Lindl. EN SAN MARTÍN CUAUTLALPAN, ESTADO DE MÉXICO

Efrén Hernández Álvarez¹, Carlos Rodríguez Franco², Agustín Gallegos Rodríguez³ y Raymundo Villavicencio García³

RESUMEN

La continuidad de un bosque depende de su regeneración, que es la base del rendimiento sostenido de un área forestal; sin embargo, en México no se le ha dado la suficiente atención a este aspecto. Es necesario poder determinar en qué momento la nueva población ya se ha establecido, lo que se valora por medio de parámetros que se pueden utilizar para supervisar la recuperación de áreas intervenidas. Sobre este supuesto, el presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de evaluar el comportamiento del crecimiento en altura y diámetro de brinzales de *Pinus hartwegii* a 23 cm del suelo. El trabajo de campo se realizó en 48 sitios de muestreo del Inventario Forestal Continuo de la ex – Unidad Industrial de Explotación Forestal San Rafael, que se localizaron por medio de cartas, mapas y fotografías aéreas; se seleccionaron dos ejemplares cercanos a cada sitio, a los que se les practicaron análisis troncales. Los resultados indican que la regeneración de *P. hartwegii* está completamente establecida, a los 8 y 9 años de edad, cuando alcanzan tallas de entre 1.22 y 1.37 m. El comportamiento del crecimiento en altura y diámetro presenta una tendencia sigmoideal, propia de diferentes especies de árboles. Los modelos obtenidos son satisfactorios para las condiciones descritas.

Palabras clave: Análisis troncales, brinzal, crecimiento en altura, crecimiento en diámetro, *Pinus hartwegii*, regeneración.

Fecha de recepción: 04 de febrero de 2002.

Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2005.

¹ Departamento de Madera, Celulosa y Papel, CUCEI, Universidad de Guadalajara. Correo-e: ehernan@biom.uni-freiburg.de

² Office of International Research Programs, USDA-Agricultural Research Service.

³ Departamento de Producción Forestal, CUCBA, Universidad de Guadalajara.

ABSTRACT

The continuance of a forest depends on its regeneration, as it is the basis for sustainable yield. However, forest regeneration has not been properly supported in Mexico. It is mandatory to determine when the new population has established, a fact that is regularly assessed through parameters that can be used to supervise the restoration of man-affected areas. The objective of the following study was to assess the height and diameter growth (at 23 cm above the forest floor) of *Pinus hartwegii* saplings. The study was conducted at the former Unidad Industrial de Explotación Forestal "San Rafael", 48 permanent plots were located through maps and aerial photographs, and two saplings near the sampling plots were selected for stem analysis. Regeneration of *P. hartwegii* is completely established after 8 to 9 years when the trees reach a total height of 1.22 to 1.37 m. Height and diameter growth curves follow a sigmoidal tendency, similar to that of most tree species. The statistical models obtained are appropriate for the conditions described above.

Keywords: Stem analysis, sapling, height growth, diameter growth, *Pinus hartwegii*, regeneration.

INTRODUCCIÓN

La permanencia de un bosque depende de su regeneración, que es la base del rendimiento sostenido de un área forestal. Este es un concepto que toda empresa debe conocer y/o manejar, si se quiere continuar usufructuando los beneficios del bosque a largo plazo.

La regeneración natural no ha tenido la suficiente atención en México. Tradicionalmente se asumió que ésta se lograba en las áreas bajo aprovechamiento, al considerar la incorporación de nuevos individuos que no se habían inventariado antes del mismo (Musálem *et al.*, 1985). Sin embargo, aún es escasa la información referente a los estándares de la repoblación de un área intervenida en un plazo no mayor a 5 años para las diferentes especies del país, además del conocimiento sobre la influencia de otros factores como la cobertura uniforme del área con plántulas de la especie principal, o bien, el que la nueva estructura arbolada corresponda al tipo de corta de regeneración aplicada, con el balance adecuado del número de árboles mínimo requerido por unidad de superficie.

De acuerdo con Rodríguez (2002), son pocos los estudios en el país acerca de los patrones de crecimiento del renuevo de las diferentes especies de pino, destaca el realizado por Rodríguez y García (1989) con *Pinus douglasiana* Martínez en Jalisco y particularmente para *Pinus hartwegii* Lindl. no se tienen antecedentes.

Por otro lado, a pesar de que la utilidad de los mismos la reconozcan los profesionales del ramo, no la tomen en cuenta, por ejemplo, en la supervisión de la efectividad de los métodos de regeneración silvícola. Es común estimar como satisfactorio el establecimiento de 2,500 árboles/ha a los 5 años de la corta de regeneración, sin importar si se concentran solamente en una parte del terreno, como también lo es cuando este número de árboles alcanza una altura de 1.3 m sobre el nivel del suelo, lo cual puede ocurrir después del tiempo arriba señalado, lo que depende de la velocidad de crecimiento de las especies.

Por ello, los estudios de los rebrotes contribuirán a precisar el momento en el que la regeneración puede ser considerada como establecida, lo que en conjunto con la contabilización de la densidad forestal, su distribución en el terreno y su estructura, definirán los parámetros que se usen como referencia en la supervisión de la recuperación de áreas intervenidas con cortas de regeneración; en este contexto, la presente investigación tiene una aplicación práctica directa en las actividades de manejo forestal. Así, su objetivo general consistió en determinar los patrones de crecimiento en altura y diámetro a 23 cm de altura del tallo de la regeneración de *Pinus hartwegii* en el área de la ex – Unidad de Explotación Forestal San Rafael, en el predio de San Martín Cuautlalpan, municipio de Chalco, Estado de México.

Crecimiento del árbol

El crecimiento es el incremento gradual de un organismo o población en un lapso de tiempo (Prodan, 1968). La transformación de las plántulas en árboles es un proceso complejo que implica una expansión de cada punto de crecimiento que forma los brotes de la copa y de las raíces (crecimiento primario), y un incremento en diámetro del tallo y raíces (crecimiento secundario). Una combinación de ambos da como resultado una estructura aérea y forma característica para cada especie (Spurr y Barnes, 1980).

En los árboles se involucra la adición de tejidos a las raíces, tallo, hojas y estructuras reproductivas por medio de la división celular y la producción de nuevo protoplasma. Crecen en longitud y por la actividad de los tejidos meristemáticos, mismos que son una pequeña fracción de la masa total del árbol (Kozłowski, 1971b). El desarrollo en altura sigue un patrón regular, el cual depende de la producción de yemas durante el periodo vegetativo anterior. Cada año, éstas se convierten en brotes anuales muy visibles. Su crecimiento resulta de la apertura y expansión de sus contenidos en los ejes principales y ramas. Después de que dichas estructuras están completamente formadas, se presenta un periodo de inactividad y una elongación posterior, que depende de la generación de otra nueva y su expansión subsecuente (Kozłowski, 1971b). El alargamiento de la raíz también ocurre como consecuencia de la activación de los numerosos meristemas

localizados en la punta. Los sitios de crecimiento apical contienen células de estos tejidos, que eventualmente producirán nuevas células, mismas que a su vez se generan en las fases secuenciales de división, elongación, diferenciación y maduración. Dichos procesos ocurren en orden, a distancias variables desde la punta de los brotes y raíces (Kozłowski, 1971a).

El patrón básico de crecimiento y la apariencia general de los árboles están controlados por la información genética de la especie, pero su hábito de crecimiento está fuertemente influido por los factores ecológicos. Como están expuestos al impacto ambiental durante toda su vida, su morfología se ve afectada de distintas maneras. Así, la forma característica de la copa que asumen los árboles está asociada con la elongación diferencial de las yemas y las ramas, lo cual corresponde al fenómeno de dominancia apical que determina el patrón de cambio del brote anual de crecimiento (Brown, 1980).

Análisis troncales

El procedimiento para reconstruir el crecimiento e incremento del árbol durante su vida se denomina análisis troncal (Klepac, 1976), que constituye el camino más directo y preciso para estudiar el desarrollo de un árbol, evaluar su crecimiento e investigar diferentes relaciones que lo controlan. Por este conducto es factible conocer cómo se desarrollan la altura y el diámetro, así como el modo en que va cambiando de forma y aumenta su tamaño. En la elaboración de un análisis troncal se cuentan y miden los anillos de crecimiento sobre secciones transversales a diferentes alturas del suelo. Las mediciones pueden tomarse de un árbol en pie utilizando un taladro, si el árbol no es muy grande o si la madera no es muy dura; no obstante, es más conveniente, y más exacto obtenerlas de trozas de secciones transversales (Husch *et al.*, 1982; Avery y Bukhart, 1983 y Prodan *et al.*, 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el predio de San Martín Cuautlalpan, Chalco, estado de México, esta propiedad tiene una superficie de 1200 ha, con vegetación representativa de los bosques locales. El estrato arbóreo está compuesto por especies de clima templado frío, entre las que predominan *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham., *Alnus acuminata* HBK. y otras especies del género *Quercus*.

P. hartwegii se establece en las partes altas a partir de los 3400 msnm, en donde forma masas puras o en ocasiones se asocia con *A. religiosa* y *P. montezumae* en las zonas de transición. Cuando está presente en masas puras, la densidad es baja debido a las condiciones climáticas que imperan en el rango altitudinal en que crece la especie (UIEF San Rafael, 1986).

El predio se localiza entre los 98° 41' 18" y 98° 41' 36" longitud oeste, y entre los 19° 15' 44" y los 19° 18' 11" latitud norte; limita al sur con los predios Santa María Huechocolco y Tlalmanalco; al norte con el Parque Nacional Zoquiapan y el predio Luis Camacho; al este con el Parque Nacional Zoquiapan; y al oeste con las áreas de corta IX, X y XI del mismo predio (UIEF San Rafael, 1986). La topografía es montañosa, destacando los cerros denominados Pedregal (3340 msnm), Agua Escondida y Chingueretería, ambos con 3540 msnm. El cerro la Teja es el más alto, con 3620 msnm.

El clima de la zona es húmedo con invierno seco, semifrío y sin estación invernal definida (García, 1968). La precipitación anual se estima en 250 a 1400 mm, distribuidos en los meses de mayo a octubre (Caballero y Zerecero, 1972). La temperatura media anual es de 13.2°C, siendo la máxima de 31°C en mayo y la mínima de -3°C en octubre (SARH, 1980).

Los suelos del lugar presentan variabilidad en texturas, pudiéndose encontrar las definidas como mijagón-arcillo-limoso, con un pH ligeramente ácido (6.35 a 6.80) y un contenido de materia orgánica de 6.83 (Caballero y Zerecero, 1972).

Metodología del estudio

El trabajo de campo se realizó en 48 sitios de muestreo del Inventario Forestal Continuo (IFC) de la ex - Unidad Industrial de Explotación Forestal San Rafael establecidos en el predio, distribuidos de manera sistemática, con una equidistancia entre líneas de 400 m y de 250 m entre sitios. Para ubicarlos se revisaron las cartas y mapas de la zona, así como fotografías aéreas. En cada uno, se delimitaron parcelas circulares de 10 m de radio, de acuerdo con las recomendaciones de Sachtler (1975) para estudios de regeneración. El diseño de muestreo fue selectivo, para lo cual se escogieron dos brinzales cercanos a cada sitio de muestreo (no al centro del mismo), libres de defectos físicos, sin síntomas de daño por efecto del ataque de insectos o enfermedades, y que fuesen representativos de la mayoría del renuevo presente en el lugar. El tamaño de muestra configurado de esta manera fue de 86 brinzales.

Los brinzales se cortaron a 3 cm de altura, después se marcaron secciones a cada 20 cm de longitud hasta donde fue posible tener trozas de dicha magnitud. De cada una de ellas se obtuvieron rodajas de 3 cm de grosor. En la cara

contraria de la rodaja en donde se realizó el corte se anotaron datos de control: el número de árbol, número de sitio, altura de la sección de corte y la especie. De la última sección se midió la distancia a la yema apical.

El conteo de los anillos de crecimiento y la medición del diámetro a diferentes edades, a lo largo de todas y cada una de las secciones del brinjal se llevó a cabo mediante la utilización de la metodología propuesta por Rodríguez (1980). Esta información fue consignada en hojas de registro para su análisis posterior. A los datos obtenidos de los análisis troncales por ciclo anual de crecimiento para las variables altura y diámetro del tallo a 23 cm del suelo se les aplicó un análisis de regresión para determinar el mejor modelo de crecimiento en función de la edad y que representara el comportamiento de las variables señaladas para la especie de interés. Finalmente, se elaboraron gráficas del crecimiento e incrementos anuales en altura y diámetro del tallo a la distancia indicada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la información de los 86 brinzales de *Pinus hartwegii* llegó a los resultados para las variables incremento en altura e incremento en diámetro del tallo.

Crecimiento en altura

Los resultados de los análisis troncales por ciclo anual de crecimiento para la variable altura, fueron ajustados al modelo de regresión siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 (X_i) + \beta_2 (X_i)^2 \text{ derivándose el modelo (1)}$$

$$ALT_i = -18.924250 + 19.748837 (EDAD_i) - 0.265416 (EDAD_i)^2, \dots \dots \dots (1)$$

El análisis de varianza que se indica en el Cuadro 1 sugiere que el modelo presenta un valor alto para el coeficiente de determinación ($r^2 = 0.77$), un valor bajo del cuadrado medio del error (CME = 670.01294) y un alto nivel de significancia ($pr \geq 0.0001$), indicando con ello un ajuste satisfactorio del modelo a los datos, por lo que existe evidencia altamente significativa de que el modelo obtenido (1) contribuye a predecir el comportamiento en altura hasta la edad de 15 años para brinzales de *Pinus hartwegii* en las condiciones de crecimiento locales.

Con respecto al parámetro estimado para $\beta_0 = -18.924250$, los resultados del análisis de varianza muestran evidencia altamente significativa ($pr \geq 0.0001$)

de que éste contribuye al ajuste del modelo; su utilidad práctica es que permite que en el ajuste de la variable dependiente su valor inicial pase por la interceptada al origen. En relación al parámetro estimado para $\beta_1 = 19.748837$, los resultados del análisis de varianza también son altamente significativos ($pr \geq 0.0001$) de que éste participa en la predicción del comportamiento del crecimiento en altura, lo que supone que por cada unidad que incrementa la edad, la altura también crece en la misma proporción que el valor de β_1 siempre y cuando los parámetros restantes permanezcan constantes en el modelo. Para el parámetro estimado $\beta_2 = -0.265416$, los resultados del análisis de varianza son significativos en el mismo sentido ($pr \geq 0.0318$), lo que sugiere que por cada unidad que la edad crezca, la altura decrementa en 0.265416 unidades cuadráticas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de varianza para el modelo:

$ALT_i = -18.924250 + 19.748837 (EDAD_i) - 0.265416 (EDAD_i)^2$ que describe el crecimiento en altura para brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan municipio de Chalco, Estado de México.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	Coefficiente de determinación (r^2)	Nivel de significancia (α)
Regresión	2	418261.23627	0.7747	0.0001**
Error	363	670.01294		
Total	365			

Parámetros estimados	Valor de (β_i)	Nivel de significancia (α)
Ordenada al origen (β_0)	-18.924250	0.0001**
Edad (β_1)	19.748837	0.0001**
Edad ² (β_2)	-0.265416	0.0318*

**Altamente significativa al nivel de probabilidad indicado.

* Significativo al nivel de probabilidad indicado.

En el Cuadro 2 se presentan los valores del crecimiento en altura de brinzales de *Pinus hartwegii* predichos con el modelo 1. Abarcan un periodo de predicción de 15 años, durante el cual es posible apreciar que varía durante el primer año de 0.005 m a 2.17 m. Con base en el supuesto de que la regeneración se considera establecida cuando alcanza una altura de 1.3 m sobre el nivel del suelo, esto ocurriría para el predio evaluado entre los 8 y 9 años de edad. En la Figura 1 es posible observar que el comportamiento del crecimiento en altura tiende a disponerse de la forma sigmoideal típica del fenómeno correspondiente a cualquier ser vivo (Klepac, 1976). Sin embargo, el comportamiento de la curva no está claramente definido debido a que el espectro de proyección cubre una porción muy pequeña del turno biológico de la especie evaluada, que puede llegar a ser al menos de 120 años (Orantes, 1981); pero por otro lado, es posible confirmar que el aumento en altura de manera constante sigue el patrón característico del crecimiento de las especies forestales en etapas tempranas de desarrollo.

Estos resultados se reafirman con las curvas de incremento corriente y medio anual en altura (Figura 2) para la especie evaluada, aunque a partir de los 8 años de edad se advierte una ligera disminución que puede obedecer a diferentes factores, entre los que destacan la presencia de incendios frecuentes y el pastoreo en la zona. A partir de los escasos antecedentes sobre el particular, no es posible sustentar cuál es el efecto que causa este tipo de disturbios en los ritmos de crecimiento y desarrollo de las especies de pino en el país.

Crecimiento en diámetro del tallo de brinzales de *Pinus hartwegii*

Los resultados de los análisis troncales por ciclo anual de crecimiento para la variable diámetro del tallo a 23 cm del suelo, fueron ajustados al modelo de regresión siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 (X_i) \text{ derivándose el modelo (2)}$$

$$D_i = -0.051050 + 0.292114 (EDAD), \dots \dots \dots (2)$$

El análisis de varianza (Cuadro 3) indica que el modelo presenta un valor alto para el coeficiente de determinación ($r^2 = 0.74$), un valor bajo del cuadrado medio del error (CME = 0.19712) y un alto nivel de significancia ($pr \geq 0.0001$), indicando con ello un ajuste satisfactorio, por lo que existe evidencia altamente significativa de que el modelo obtenido (2) contribuye a predecir el comportamiento en diámetro del tallo, hasta los 15 años para brinzales de *Pinus hartwegii* en las condiciones prevalecientes en el lugar.

Cuadro 2. Proyección del crecimiento en altura con el modelo:

$ALT_t = -18.924250 + 19.748837 (EDAD_t) - 0.265416 (EDAD_t)^2$ para
brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan
municipio de Chalco, Estado de México.

Edad (años)	Altura (m)	Incremento Corriente Anual en Altura (ICAA) m/año	Incremento Medio Anual en Altura (IMAA) m/año
1	0.0055	0.0055	0.0055
2	0.1951	0.1895	0.0975
3	0.3793	0.1842	0.1264
4	0.5582	0.1789	0.1395
5	0.7318	0.1736	0.1463
6	0.9001	0.1682	0.1500
7	1.0631	0.1629	0.1518
8	1.2207	0.1576	0.1525
9	1.3731	0.1523	0.1525
10	1.5202	0.1470	0.1520
11	1.6619	0.1417	0.1510
12	1.7984	0.1364	0.1498
13	1.9295	0.1311	0.1484
14	2.0553	0.1258	0.1468
15	2.1758	0.1205	0.1450

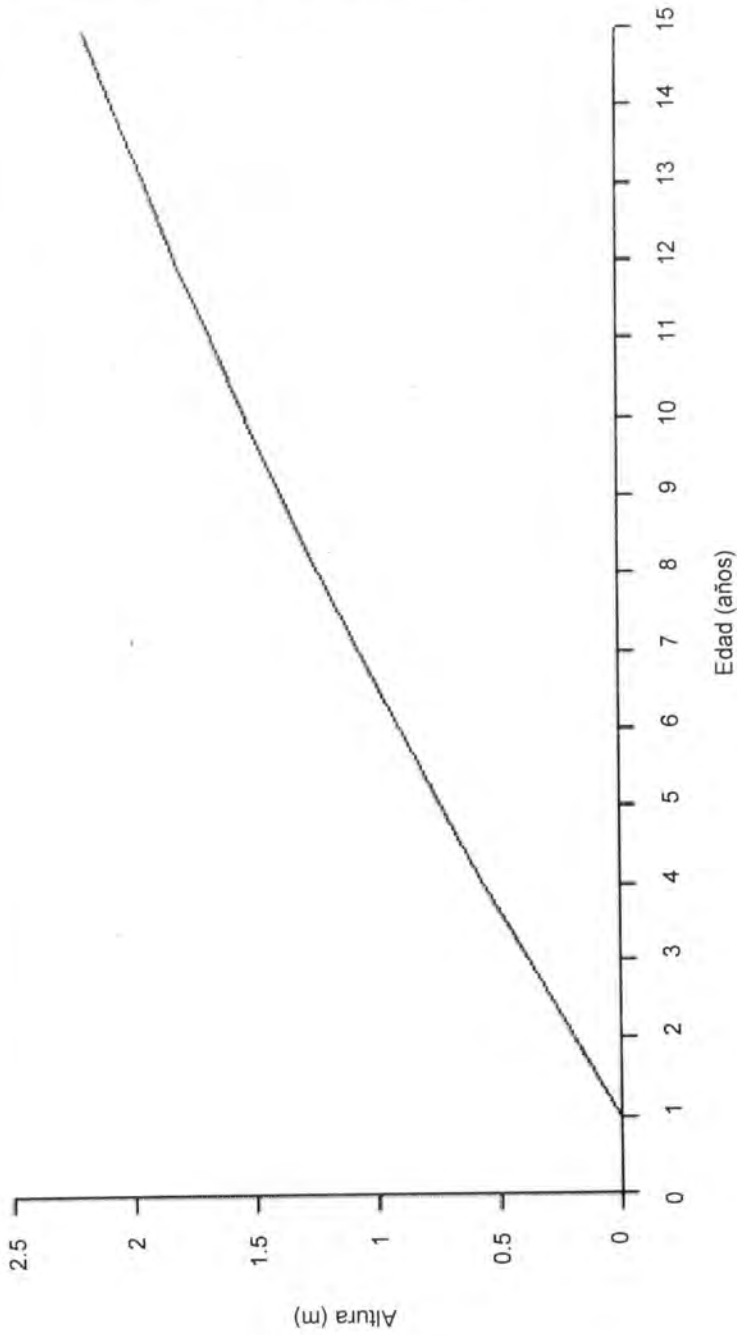


Figura 1. Crecimiento en altura para brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan municipio de Chalco, Estado de México.

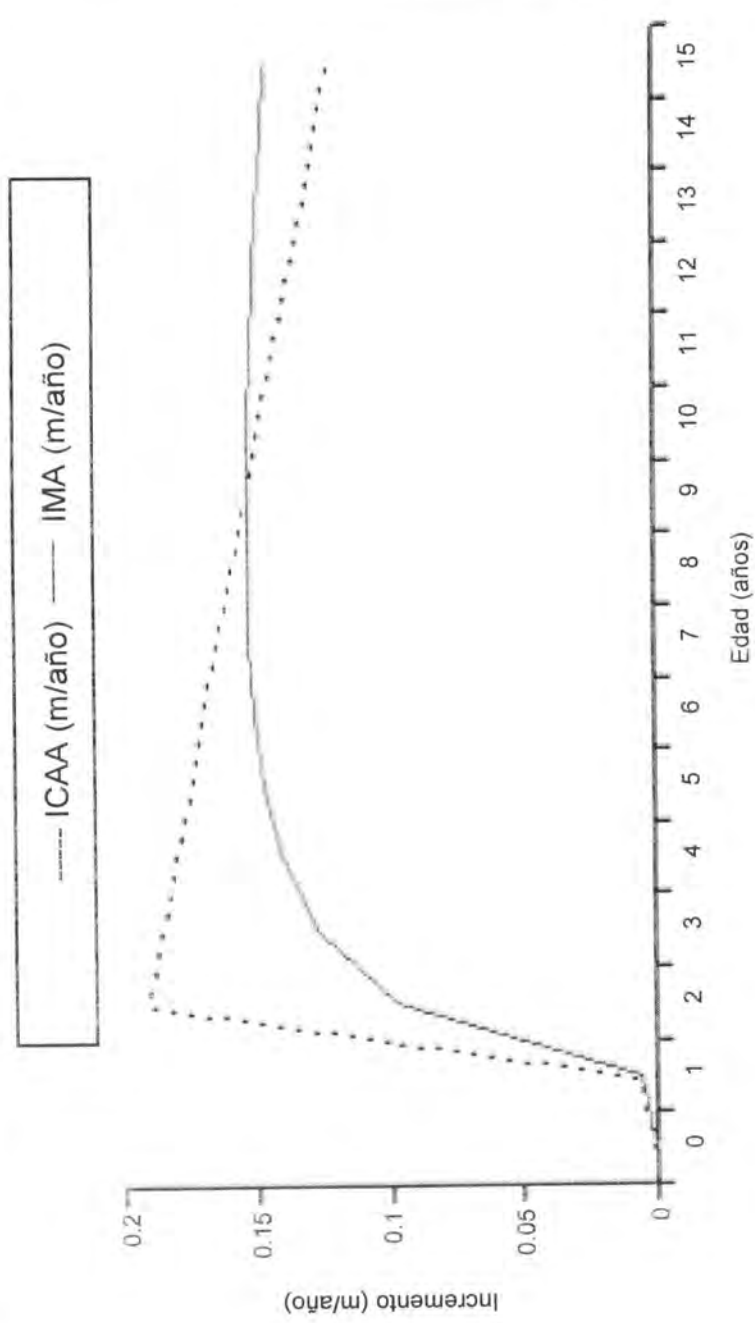


Figura 2. Incrementos en altura para brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan municipio de Chalco, Estado de México.

Con respecto al parámetro estimado para $\beta_0 = -0.051050$, los resultados del análisis de varianza son significativos ($pr \geq 0.3946$), por lo que favorece el ajuste del modelo (Cuadro 3); su utilidad práctica es que hace posible que en el ajuste de la variable dependiente, su valor inicial pase por la interceptada al origen. En relación a $\beta_1 = 0.292114$, los resultados también son altamente significativos ($pr \geq 0.0001$) e igualmente participan en la predicción del comportamiento del crecimiento en diámetro del tallo, pues por cada unidad que aumenta la edad, el diámetro también lo hace en la misma cantidad que el valor de β_1 , siempre y cuando los parámetros restantes permanezcan constantes en el modelo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Análisis de varianza para el modelo:

$D_i = -0.051050 + 0.292114 (EDAD_i)$ del crecimiento en diámetro del tallo a 23 cm del suelo para brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan municipio de Chalco, Estado de México.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	Coefficiente de determinación (r^2)	Nivel de significancia (α)
Regresión	1	174.51622	0.7419	0.0001**
Error	308	0.19712		
Total	309			
Parámetros estimados	Valor de (β_i)		Nivel de significancia (α)	
Ordenada al origen (β_0)	- 0.051050		0.3946*	
Edad (β_1)	0.292114		0.0001**	

* Significativo al nivel de probabilidad indicado

** Altamente significativa al nivel de probabilidad indicado

En el Cuadro 4 se ordenan los valores del crecimiento en diámetro del tallo de los brinzales estudiados de *Pinus hartwegii* predichos con el modelo 2, para las condiciones generales de crecimiento. Los resultados abarcan un período de predicción de 15 años, durante el cual es posible advertir que dicha dimensión varía durante el primer año de 0.24 cm a 4.33 cm, hasta la última edad considerada.

El patrón de crecimiento en diámetro de los brinzales se puede observar gráficamente en la Figura 3. De acuerdo con Klepac (1976) el ritmo de crecimiento en diferentes dimensiones de los estados iniciales de desarrollo tiende a ser constante para bastantes especies de árboles. Estos resultados se confirman al observar el comportamiento de curvas de incremento corriente y medio anual en diámetro (Figura 4) para la especie evaluada.

Cuadro 4. Proyección del crecimiento en diámetro del tallo a 23 cm del suelo con el modelo:

$D_i = -0.051050 + 0.292114 (EDAD_i)$ para brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan municipio de Chalco, Estado de México.

Edad (años)	Diámetro (cm)	Incremento Corriente Anual en Diámetro (ICAD) cm/año	Incremento Medio Anual en Diámetro (IMAD) cm/año
1	0.2410	0.2410	0.2410
2	0.5331	0.2921	0.2665
3	0.8252	0.2921	0.2750
4	1.1174	0.2921	0.2793
5	1.4095	0.2921	0.2819
6	1.7016	0.2921	0.2836
7	1.9937	0.2921	0.2848
8	2.2858	0.2921	0.2857
9	2.5779	0.2921	0.2864
10	2.8700	0.2921	0.2870
11	3.1622	0.2921	0.2874
12	3.4543	0.2921	0.2878
13	3.7464	0.2921	0.2881
14	4.0385	0.2921	0.2884
15	4.3306	0.2921	0.2887

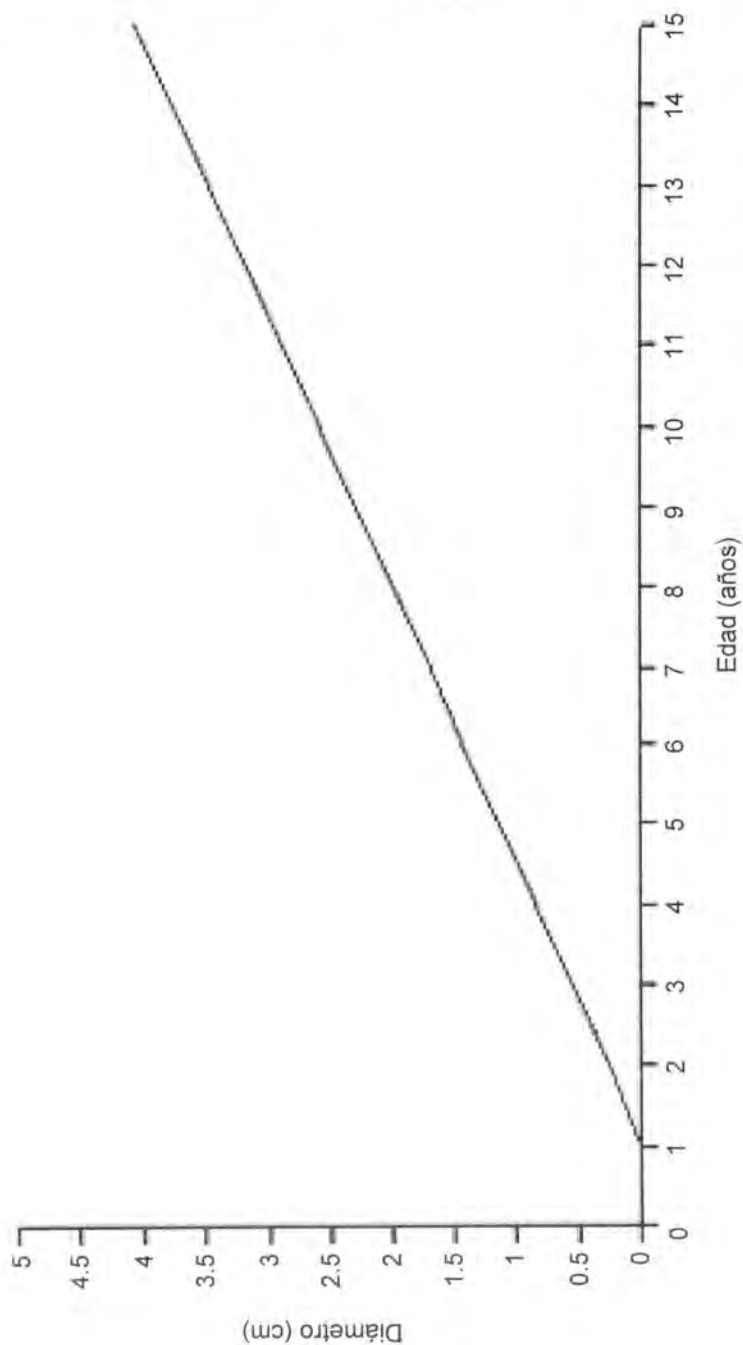


Figura 3. Crecimiento en diámetro para brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan municipio de Chalco, Estado de México.

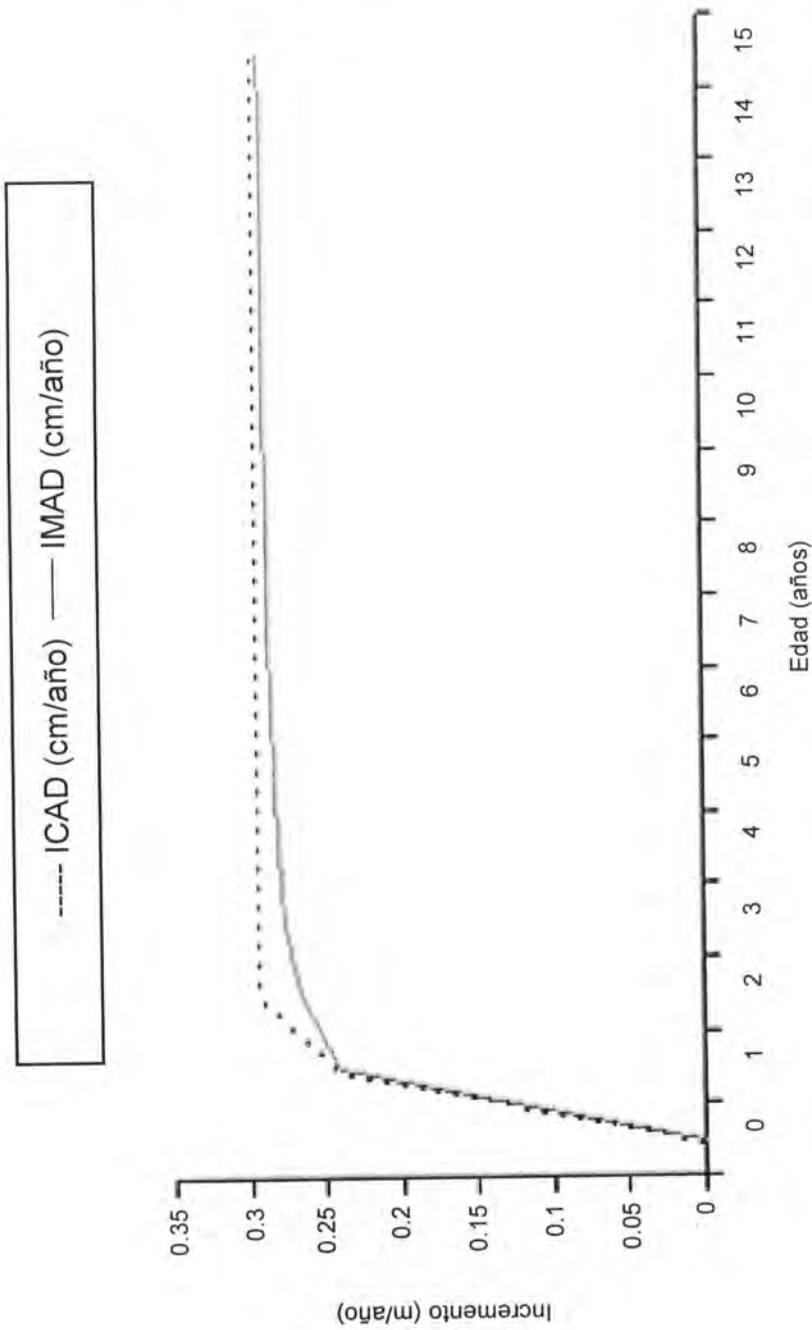


Figura 4. Incrementos en altura para brinzales de *Pinus hartwegii* en el predio San Martín Cuautlalpan municipio de Chalco, Estado de México.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los ritmos de crecimiento en altura, la regeneración de *Pinus hartwegii* Lind. está completamente establecida entre los 8 y los 9 años de edad, que es cuando alcanza un tamaño en altura entre 1.22 y 1.37 m. Tanto ésta como el diámetro presentan una tendencia sigmoideal propia del comportamiento de las curvas de crecimiento de las especies de árboles. Los modelos obtenidos para predecir ambos son satisfactorios bajo las condiciones de estudio.

REFERENCIAS

- Avery, T. E. y H. E. Burkhardt, 1983. Forest measurements. 3rd ed. McGraw-Hill. New York, NY. 331 p.
- Brown, C. L. 1980. Primary growth. In: M. H. Zimmerman and C. L. Brown (Eds.). Trees: structure and function. Springer-Verlag, New York, NY. 553 p.
- Caballero D., M. y Zerecero L., G. A. 1972. Generalidades sobre el inventario forestal continuo (con especial referencia a su aplicación en Norte América). In: Memoria de la primera reunión nacional sobre inventario forestal continuo. DGINF. Publicación No. 23. México. pp. 37-66.
- García, E. 1968. Los climas del Valle de México. Colegio de Postgraduados. México. 63 p.
- Husch, B., Ch. I. Miller and T. W. Beers. 1982. Forest mensuration. 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc. New York, NY. 402 p.
- Klepac, D. 1976. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Bosques. Texcoco, México. 365 p.
- Kozlowski, T. T. 1971a. Growth and development of trees. Academic Press, Inc., New York, NY. Volume I: Seed germination, anatomy, and shoot growth. 445 p.
- Kozlowski, T. T. 1971b. Growth and development of trees. Academic Press, Inc., New York, NY. Volume II: Cambial growth, root growth, and reproductive growth. 514 p.
- Musálem, M. A., M. A. Velázquez y M. J. González G. 1985. Algunas consideraciones ecológico-silvícolas en el establecimiento inicial de la regeneración natural en bosques de clima templado-frío de la región central. Memoria del Simposio sobre Silvicultura y Manejo de Bosques en México. México, D. F. 28 p.
- Orantes G., F. R. 1981. Determinación de la calidad de estación de *Pinus hartwegii* Lind., en la Estación Experimental Forestal Zoquiapan, Estado de México. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. 77 p.
- Prodan, M. 1968. Forest biometrics. Pergamon Press, Oxford. UK. 447 p.

- Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura forestal. Proyecto IICA-BMZ/GTZ, sobre agricultura, recursos naturales y desarrollo sostenible. San José, Costa Rica. 561 p.
- Rodríguez F., C. 1980. Estudio epidemológico de *Pinus montezumae* Lamb., en el CEF San Juan Tetla, Puebla. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 274 p.
- Rodríguez F., C. 2002. *Pinus hartwegii*. In: Pines of silvicultural importance. Compiled by CAB International. Wallingford, Oxon, UK. 528 p.
- Rodríguez, S. B. y C. X. García. 1989. Evaluación de la estructura y desarrollo de la regeneración de *Pinus douglasiana* Mtz., en Concepción de Buenos Aires, Jalisco. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 71 p.
- Sachtler, M. 1975. Evaluación de la regeneración arbórea. Actas del curso FAO/Finlandia de entrenamiento en inventario forestal. Mérida, Venezuela-Roma, Italia. pp. 355-365.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1980. Servicio Meteorológico Nacional. Boletín Climatológico. México. 439 p.
- Spurr, S. H. y B. V. Barnes. 1980. Ecología forestal. A. G. T. Editor. México. 690 p.
- Unidad Industrial de Explotación Forestal (UIEF) San Rafael. 1986. Plan de ordenación forestal. Tomo I. Anexo B. México. 172 p.

VARIACIÓN ESPACIAL DEL DIÁMETRO COMO RESPUESTA A DIFERENTES INTENSIDADES DE MUESTREO EN UNA CUENCA FORESTAL

José Germán Flores Garnica¹, Oscar Reyes Cárdenas²
y David Arturo Moreno González¹

RESUMEN

El manejo de los recursos forestales implica un adecuado conocimiento de sus características y uno de los problemas más frecuentes es la dificultad de establecer la distribución espacial de los mismos. En este trabajo se hace una comparación de dos técnicas de interpolación: 1) determinística (distancia inversa ponderada) y 2) geoestadística (kriging ordinario), las cuales fueron usadas para calcular la variación espacial en el diámetro medio del arbolado, obtenido con base en un inventario forestal que se llevó a cabo en 1200 ha de la cuenca hidrológica forestal El Carrizal, ubicada en la Sierra de Tapalpa, Jalisco. En total fueron 79 sitios que se escogieron atendiendo al diseño de muestreo sistemático. De esta muestra se tomaron submuestras en las proporciones siguientes: 87, 75, 62, 49, 36 y 24%, a fin de variar la intensidad de muestreo. Mediante análisis geoestadístico se produjeron los variogramas experimentales correspondientes a cada intensidad, los cuales se ajustaron a los modelos más adecuados, para luego realizar las interpolaciones respectivas. Las interpolaciones determinísticas se hicieron directamente. El criterio de comparación entre las dos técnicas fue el valor mínimo del cuadrado medio del error. Una vez seleccionadas tanto la técnica de interpolación como la intensidad de muestreo, se generaron las superficies continuas que ilustran el comportamiento espacial del diámetro. Los resultados sugieren que las dos técnicas definen una precisión similar.

Palabras clave: Distancia inversa ponderada, geoestadística, intensidad de muestreo, kriging ordinario, modelaje espacial, técnicas de interpolación.

Fecha de recepción: 13 de mayo de 2005.

Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2005.

¹ Campo Experimental Colomos, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, INIFAP
Correo-e: flores.german@inifap.gob.mx; moreno.davidarturo@inifap.gob.mx

² Facultad de Ingeniería en Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato.

ABSTRACT

Management of forest resources implies an adequate knowledge of their characteristics and spatial distribution, although it is common to find problems when implementing this process. This paper compares two interpolation techniques: 1) deterministic (inverse distance weighted) and 2) geostatistical (ordinary kriging). Both techniques were used to determine the spatial variation of the mean diameter in trees from the same forest region. Data were gathered throughout a forest inventory carried out in El Carrizal watershed in the Sierra de Tapalpa, Jalisco. 79 sites were sampled using a systematic sampling design and sub-samples series were randomly developed from this sample, to generate groups with different percentage sampling intensities (87, 75, 62, 49, 36 and 24%), subsamples series were randomly defined. Based on the geostatistical analysis, the corresponding experimental variograms were generated for each sampling intensity. These variograms were fitted to the best model, which were used to develop the corresponding interpolations. Deterministic interpolations were made directly. The lower mean square error was the selection criterion to choose between the two interpolation techniques. After the selection of the interpolation technique and sampling intensity, the corresponding continual surfaces were generated to show the spatial diameter response among trees. It is concluded that both techniques have similar accuracy for the determination of spatial variation.

Key words: Inverse distance weighted, geostatistics, sampling intensity, ordinary kriging, spatial modeling, interpolation techniques.

INTRODUCCIÓN

El manejo de los recursos forestales implica un adecuado conocimiento de sus características, las cuales responden a preguntas como: ¿cuánto se tiene?, ¿cuándo se tiene?, ¿cómo se tiene? y ¿dónde se tiene?. Referente a esta última, uno de los problemas más frecuentes es la dificultad de establecer su distribución espacial dentro de una región forestal. Aunque la planeación y realización de los inventarios forestales se hace con mucho cuidado, en la elaboración de los mapas correspondientes frecuentemente se parte de pocas bases técnicas. Por ejemplo: (1) existen problemas en la definición de los límites espaciales entre una categoría y la otra, como puede ser con clases de diámetro o de altura; (2) no se aplican técnicas para definir la continuidad espacial de alguna variable forestal, con base en cierto número de sitios de muestreo; (3) en algunos casos, las áreas de respuesta homogénea se seleccionan con base en el agrupamiento "manual" de sitios muestreados con valor similar. Como consecuencia de esto, se generan mapas temáticos con poca precisión espacial, los que influyen en los procesos

de toma de decisiones de dos formas: I) Al subestimar el valor de una característica forestal, que conlleva a no aprovechar al máximo el potencial de dicha área; II) Sobrestimando dicho valor, lo que tiende, por lo general, a una sobreexplotación del recurso. Lo más indicado sería definir el tamaño de muestra requerido, para que con el menor costo se establezca el menor número de sitios y la mayor precisión espacial.

De acuerdo con lo anterior, en el presente trabajo se muestra un análisis comparativo de dos técnicas de interpolación para definir la distribución espacial de la variable diámetro medio (a la altura de pecho [1.30 m]) de una masa forestal. Se consideró esta variable porque se requiere dicha información para apoyar la planeación del aprovechamiento de resina. Además, se analiza el comportamiento de cada una de las técnicas de interpolación bajo diferentes intensidades de muestreo. Se probaron las siguientes hipótesis nulas: $H_{0(1)}$: No existe ninguna influencia en la precisión de las estimaciones de interpolación, debida a cambios en la intensidad de muestreo. $H_{0(2)}$: La autocorrelación espacial de las variables forestales no es lo suficientemente alta para que la precisión de las estimaciones con técnicas de interpolación geoestadística sean superiores a las basadas en técnicas de interpolación determinística. Es importante señalar que, sobre la evaluación de diferentes tamaños de muestra en la definición de la distribución espacial de una variable dada en particular, no se encontraron antecedentes ni en México ni a nivel mundial (Flores y Omi, 2003).

Calcular el tamaño de muestra más adecuado en el estudio de cualquier variable de una masa forestal al menor costo y con la mayor precisión es una de las etapas en las que se debe poner especial atención al realizar un inventario forestal. De esto dependerá la utilidad de los resultados que se obtengan. El hecho de llevar a cabo un muestreo obedece a que un censo demanda mucho más tiempo y un gasto que en la mayoría de los casos no es posible. Por lo tanto, es conveniente diseñar una estrategia para determinar la forma y el lugar en que se tomará la información de interés, lo que implica no sólo establecer el número de sitios para el muestreo, sino también su ubicación geográfica, con lo que se procura que la información generada sea precisa en cuanto a la variación en su distribución espacial.

En esta ocasión era necesario determinar la localización de las áreas con mayores diámetros del arbolado (a 1.30 m), con el propósito de apoyar la planeación de la extracción de resina. Para ello, la información de diámetros medios obtenida por conducto de inventarios forestales puede ser analizada mediante técnicas de interpolación, como lo son la distancia inversa ponderada y kriging ordinario (Burrough y McDonnell, 1998); con ellas se modela la distribución espacial continua de esta variable.

Técnicas de interpolación

Las técnicas de interpolación están basadas en la Primera Ley de la Geografía, la cual indica que fenómenos espaciales cercanos son más similares que fenómenos alejados (Chou, 1992). Esto significa que es muy probable que los valores de puntos cercanos sean más semejantes entre sí, que con valores de puntos más lejanos (Burrough y McDonnell, 1998). Este principio es usado para predecir los valores de diámetro de arbolado en áreas no muestreadas, sobre la base de la ponderación lineal de las combinaciones de los valores muestreados alrededor. Para cada intensidad de muestreo, en este trabajo se usaron las dos técnicas de interpolación siguientes:

A) Distancia inversa ponderada (DIP).- Esta técnica se define desde una perspectiva determinística (Phillips *et al.*, 1992), la cual asume que el valor de un punto no muestreado es el promedio de la distancia inversa ponderada de los valores de los puntos muestreados que están alrededor (Burrough y McDonnell, 1998). Esta técnica da más peso a la observaciones más cercanas que a las lejanas (Hunner, 2000). Es decir, las ponderaciones son inversamente proporcionales a la distancia entre el punto a estimar y los puntos muestreados alrededor, la cual se define a través de la siguiente función lineal (Potter y Eenigenburg, 1999):

$$\hat{\beta}^*(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} * \beta(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Donde:

$\hat{\beta}^*(x_0)$ = Valor estimado en un sitio no muestreado en la ubicación

x_0 = Esta ubicación generalmente se refiere en un sistema de coordenadas

$\beta(x_i)$ = Valor observado en la ubicación

$x_{ii} d_i$ = Distancias de cada una de los sitios observados hacia el punto no muestreado

p = Exponente de la distancia

n = Número de sitios muestreados.

La selección del parámetro de poder (p) puede afectar significativamente los resultados de la interpolación. Por ejemplo, cuando se incrementa p , los pesos individuales llegan a ser más similares, dándosele más peso a las muestras más próximas (Hunner, 2000). En este trabajo se usó un valor de ponderación de 2, ya que fue el que mejor se ajustó a la descripción de la distribución espacial de la variable diámetro.

B) Kriging ordinario.- El método denominado "kriging ordinario" (KO) fue el segundo que se probó y consiste en una técnica geostatística (Burrough y McDonnell, 1998) que se basa en la teoría de variables regionalizadas (Oliver y Webster, 1990; Laslett *et al.*, 1987). Los antecedentes de la geostatística surgen con la necesidad de hacer estimaciones precisas de reservas minerales, ya que éstas implican un costo alto; se fundamenta en una perspectiva topoprobabilista que indica que cualquier fenómeno distribuido en el espacio presenta dos comportamientos (Matheron, 1978): a) un comportamiento aleatorio a nivel local; y b) una estructura definida a gran escala.

Kriging ordinario se aplica cuando la media de los datos es estacionaria (mantiene cierto grado de invariabilidad, cuando se estima en diferentes ubicaciones [Hunner, 2000]), pero se desconoce, y es considerado como el "mejor estimador lineal insesgado" (Hunner, 2000, Isaaks y Srivastava, 1989): Es lineal porque sus estimaciones son combinaciones lineares ponderadas de los datos disponibles. Es insesgado porque tiende a generar un cuadrado medio del error igual a cero ($E[\text{Estimado}(x_0) - \text{Observado}(x_0)] = 0$, y $E\lambda_i = 0$). Finalmente es mejor porque tiende a minimizar la varianza de los errores ($E[\text{Estimado}(x_0) - \text{Observado}(x_0)]^2 = \text{mínimo}$). La siguiente fórmula es usada para calcular las estimaciones con KO (Hunner, 2000; Isaaks y Srivastava, 1989):

$$\hat{Z}_{KO}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i)$$

Donde:

- $\hat{Z}_{KO}(x_0)$ = Estimación de KO en el punto
- x_0 = La ubicación de este punto generalmente se refiere en un sistema de coordenadas
- λ_i = Valor ponderado del sitio muestreado
- i en el punto x_i y $Z(x_i)$ = Valor de la variable observada Z en el punto x_i .

Para llevar a cabo una interpolación con base en kriging se requiere de una serie de parámetros (efecto *nugget*, *sill* y rango), que se establece al ajustar un modelo al variograma que define la autocorrelación espacial de la variable de interés (Flores, 2001). Estos parámetros fueron determinados a través del análisis estructural de los datos, donde la continuidad espacial de la variable diámetro fue definida por medio de variogramas, con un enfoque isotrópico (mismo comportamiento espacial sin importar la dirección en la que se define el variograma). El variograma se conceptúa como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales, separados una distancia h determinada (Journel y Huijbregts, 1978); es la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas a una distancia h (Starks y Fang, 1982; Isaaks y Srivastava, 1989).

El efecto *nugget* representa la variabilidad inherente de los datos, que podría obedecer a su distribución espacial y a sus errores implícitos. En teoría, el valor del efecto *nugget* debería ser cercano a cero. El rango es la distancia a la cual el variograma alcanza el valor del *sill* correspondiente, que es el valor de varianza que se define en el punto donde se ubica el rango y representa la máxima varianza de la población. Más allá de ésta, no hay una autocorrelación espacial entre los puntos muestreados. Después de cierta distancia (rango), el variograma ya no aumenta más y tiende a definir una asíntota. Generalmente, si crece la distancia entre puntos, también lo hace el variograma.

Cuadrado medio del error

Para elegir la mejor intensidad de muestreo, se usó como criterio de selección el menor cuadrado medio del error (CME) que resultara de la comparación de los valores observados con los valores estimados. También es conocido como "error cuadrático medio de un estimador", el cual incorpora tanto el sesgo [$b^2(\hat{\alpha})$], como la dispersión de la distribución del error [$V(\hat{\alpha})$]. Es decir CME es igual a la varianza del error más el sesgo al cuadrado del error, y es calculado mediante el siguiente modelo (Armstrong, 1998):

$$CME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r^2$$

Donde:

n = número de puntos de muestreo

r = residuales (errores de estimación)

Al usar CME como criterio de selección se busca que éste sea el menor posible (Al-Subaihi, 2000); no se considera la variación muestral ni la inherente al fenómeno, ya que las estimaciones son locales y no poblacionales.

Existen muchas estrategias para la selección de la muestra en el proceso de validación, como lo son la evaluación cruzada, el incorporar nuevos sitios de muestreo y la separación de un porcentaje de sitios de la muestra original (Flores, 2001); para fines prácticos, en este proyecto se optó por la última. Al respecto, algunos autores recomiendan la selección de un mínimo de 10% de la población original (Armstrong, 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una superficie de 1200 ha con bosque de pino, dentro de la cuenca hidrográfica forestal El Carrizal, ubicada a 5 km al oeste de la población de Tapalpa, Jalisco (Benavides, 1987). Su altitud varía desde 2020 hasta 2422 msnm. Así mismo, la pendiente se presenta entre 0-5 hasta 20-40%. Predominan las especies arbóreas: *Pinus michoacana* var. *cornuta* Martínez, *Pinus oocarpa* Schiede, *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *Quercus* spp. y *Alnus* spp.

Estrategia de muestreo

Con el fin de abarcar toda el área arbolada de la cuenca, se aplicó un muestreo sistemático, con una separación entre sitios de 500 m (orientados de este a oeste) y de 250 m entre líneas de sitios (orientadas de norte a sur). Los datos utilizados en este estudio fueron inventariados en 79 sitios circulares de 600 m² (Figura 1). Existe una discontinuidad en la sistematización de la ubicación de los sitios, la misma responde al hecho de que sólo se consideró el territorio forestal. No se incluyeron sitios sin arbolado como diámetro medio cero, porque dicho valor repercutiría en la interpolación.

En cada sitio se evaluó, además, el diámetro medio a la altura de pecho (cm) considerando sólo árboles mayores a 7.5 cm de diámetro. Esta información es trascendental para apoyar la planeación en los aprovechamientos de resina en la cuenca. La metodología de este estudio se ejemplifica con el caso del diámetro a la altura del pecho (1.30 m), que es una variable importante para estimar el potencial del número de caras de resinación.

Variación en la intensidad de muestreo

De los 79 sitios de muestreo se extrajeron 10 para el proceso de validación y con los 69 restantes se llevó a cabo el proceso de interpolación.

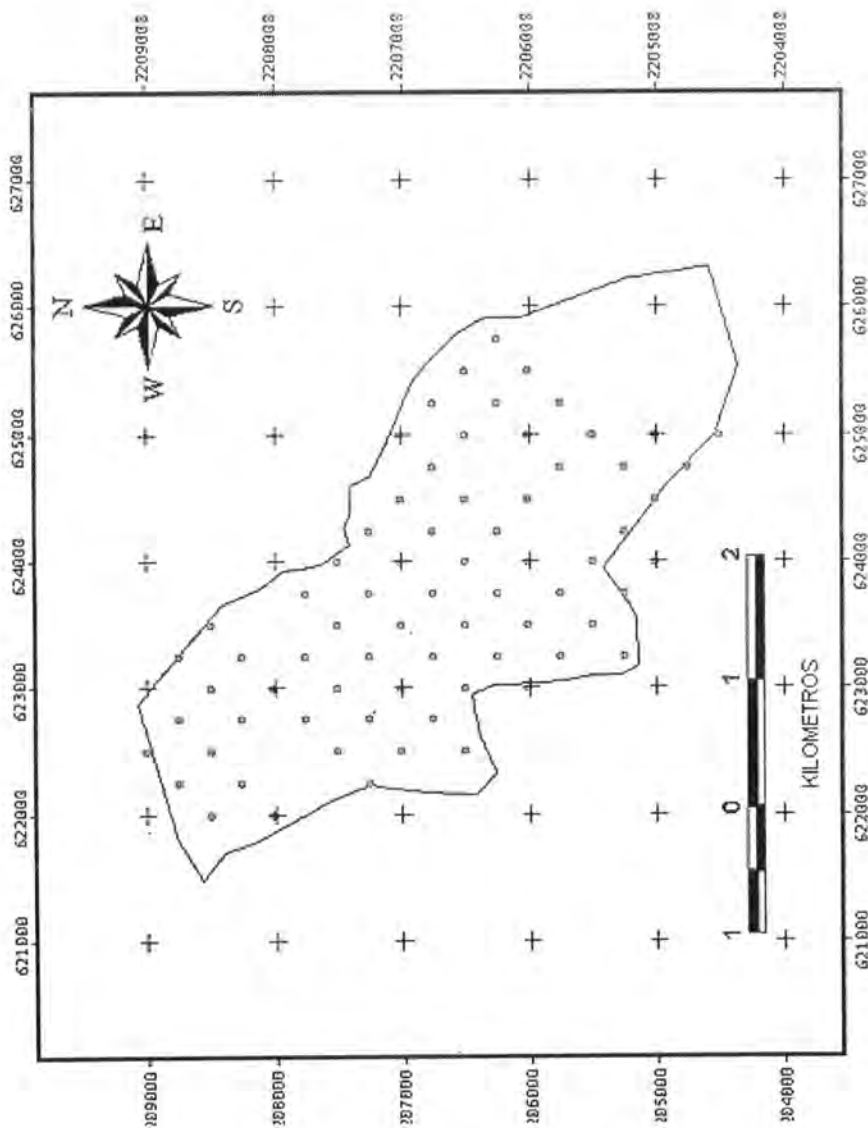


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo dentro de la cuenca El Carrizal. (Las coordenadas corresponden a la zona UTM 13).

Dado que el propósito de este trabajo fue el de evaluar diferentes intensidades de muestra para la definición de la distribución de la variable diámetro, ésta se disminuyó en rangos de 10 sitios. Los sitios eliminados se seleccionaron al azar, quedando los siguientes tamaños de muestra: 69, 59, 49, 39, 29 y 19. Dichos rangos fueron suficientes para evaluar las variaciones en la precisión de la estimación espacial de los valores de diámetro en el área de estudio.

Estrategias de interpolación

Con base en cada uno de los seis tamaños de muestra, se procedió a realizar las interpolaciones correspondientes, tanto con kriging ordinario, como con distancia inversa ponderada. Para esta última se usó el valor de dos como ponderación (p), ya que fue el que mejores resultados arrojó (menor CME).

Criterio de selección

Se tomó el cuadrado medio del error (CME) como criterio de selección para elegir: 1) la mejor técnica de interpolación; 2) la mejor intensidad de muestreo. Para la validación de resultados, se seleccionaron 10 puntos (12.65%) de la tabla de datos original, considerando que quedaran distribuidos en toda la zona de estudio. Dado que se hizo un análisis comparativo, se requirió mantener un criterio de comparación homogéneo, por lo que la validación se hizo con los mismos 10 puntos para todas las intensidades de muestreo. Posteriormente se calcularon las diferencias entre los valores observados y los estimados, residuales o errores, (Hunner, 2000) entre los valores interpolados con los valores observados. Al final, se calcularon los CME's para cada tamaño de muestra y para cada estrategia de interpolación. Se seleccionó la alternativa que definió el menor CME.

Superficies continuas

Una vez que se eligió la mejor técnica de interpolación, se procedió a generar las superficies continuas, con las cuales se pueden visualizar los valores de diámetro que corresponden a las áreas no muestreadas. Este material fue la base para la definición de los mapas temáticos finales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1 resume los valores del cuadrado medio del error (CME) en las dos técnicas de interpolación usadas al estimar la distribución espacial del diámetro para cada una de las intensidades de muestreo. El rango de variación del CME fue de 1.70 a 21.46 para el caso de kriging y de 2.16 a 20.14 para DIP. Estos rangos representan una considerable semejanza entre las técnicas de

interpolación usadas. El CME más bajo (1.70) fue obtenido a través de kriging, con un tamaño de muestra de 59 sitios, que fue muy similar al (2.16) obtenido por medio de DIP. Esto sugiere que no hubo un incremento considerable en la precisión, cuando se modela la continuidad espacial del diámetro en forma estocástica, en comparación con la forma determinística, lo cual coincide con otros trabajos (Flores, 2001). No obstante, se identificó que la mayor diferencia de valor del CME (1.5) se obtuvo en el tamaño de muestra de 49 sitios. La técnica kriging fue mejor en este sentido, con 19, 59 y 69 sitios. Sin embargo, las mayores diferencias entre las técnicas usadas se advirtieron cuando DIP fue mejor. Esto no concuerda con los resultados reportados en otras experiencias (Hunner, 2000), lo que se explica porque la distribución sistemática de los sitios implicó una ponderación constante de las relaciones (covarianzas) entre los sitios que se tomaron como base para la interpolación (Flores, 2001).

Cuadro 1. Valores del cuadrado medio del error en dos tipos de interpolación para diferentes tamaños de muestra.

Tamaño de muestra (sitios)	Kriging Ordinario	Distancia Inversa Ponderada	Diferencia
19	11.96	12.45	0.49
29	21.46	20.14	-1.32
39	16.79	15.51	-1.28
49	10.12	8.62	-1.5
59	1.70	2.16	0.46
69	9.67	10.75	1.08

En la Figura 2 se observa que al tener un número de muestra muy pequeño, el CME tiende a ser alto en ambas técnicas. Sin embargo, esto no implica que a mayor intensidad de muestreo se logre un menor CME ya que en los dos métodos de interpolación se llegó a un valor mínimo, cuando el tamaño de muestra fue de 59 sitios y, a partir de ahí, nuevamente se incrementa. La explicación es que la distribución de los 59 sitios permitió captar un efecto anisotrópico (Flores, 2001), mismo que se inhibe al considerar una mayor muestra.

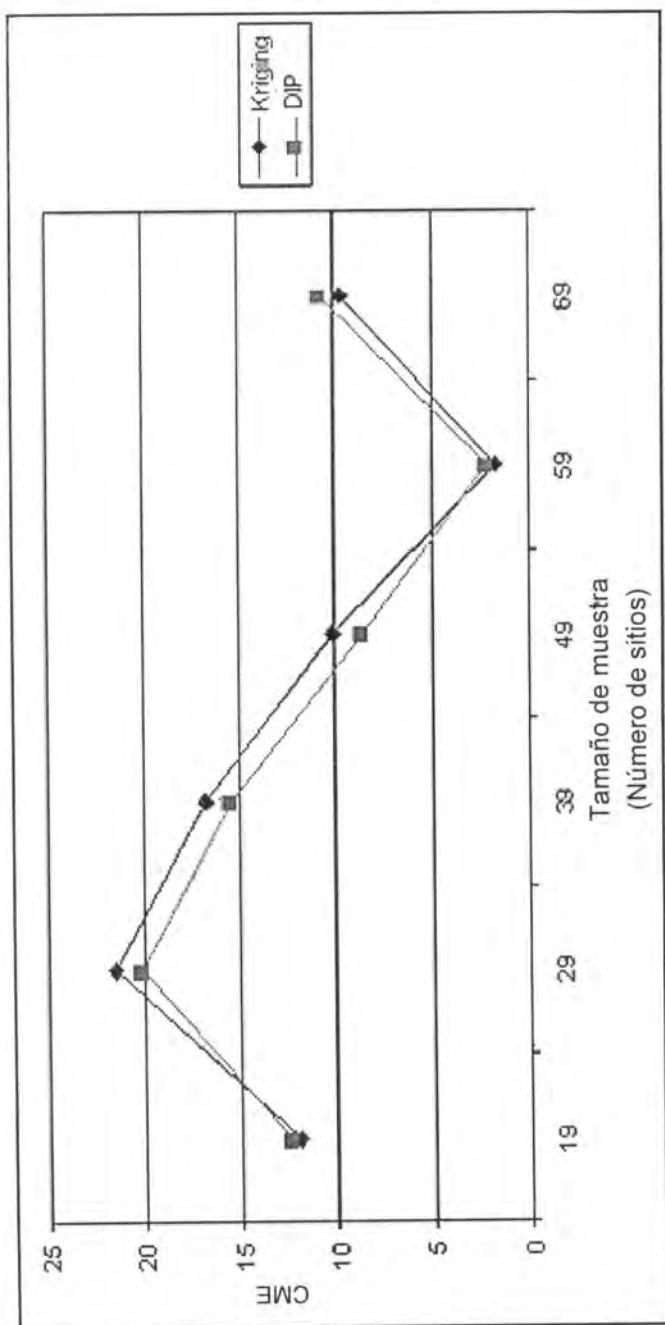


Figura 2. Variación en los valores del cuadrado medio del error (CME), con diferentes tamaños de muestra y dos técnicas de interpolación para el diámetro.

El variograma isotrópico del diámetro medio (Figura 3), que resultó del talleo de muestra de 59 sitios, indica una tendencia bien definida de la variabilidad espacial, que se ajustó mejor a un modelo esférico. En este caso la distribución en el variograma experimental es muy similar a la línea que define el *sill*. El rango correspondiente en este modelo, es decir, donde los valores del variograma más bien se estabilizan, se ubica en 3665 m aproximadamente. Esta es la distancia máxima entre dos pares de sitios, dentro de la cual se verifica una correlación espacial entre ellos, pero no hay una similitud suficiente entre los valores de los sitios por encima de este valor para que pueda ser modelada.

El parámetro *sill*, que es el valor del variograma para distancias muy grandes (Isaaks y Srivastava, 1989), se ubicó en 542 $\gamma|h|$. El efecto *nugget*, que se define como una discontinuidad en el origen (Samra *et al.*, 1989), está aproximadamente a 175 $\gamma|h|$. La diferencia entre ambos ratifica la alta autocorrelación espacial de esta variable, bajo el tamaño de muestra de 59 sitios. Sin embargo, es deseable que se definiera en intervalos más cortos.

La Figura 4 muestra las superficies continuas que resultaron de la mejor técnica de interpolación para cada una de las intensidades de muestreo. Existe una diferencia considerable en la distribución espacial de la variable diámetro al comparar las dos técnicas; mientras que las interpolaciones con kriging tienden a ser las suavizadas, DIP produce superficies que son marcadamente definidas alrededor de cada uno de los puntos de muestreo. No obstante, en general las tendencias en la ubicación de valores altos en la parte Norte y valores bajos en la Sur son similares.

En el Cuadro 2 se observa que, para el tamaño de muestra seleccionado (59), los valores de diámetro se encuentran muy dispersos alrededor de la media (30.6 cm), dado que la varianza es muy alta y el índice de curtosis es diferente de 0. Además, como el coeficiente de asimetría resultó negativo la mayoría de los valores se encuentran cargados hacia la izquierda de la media.

Los alcances de este trabajo se refieren a que es posible esperar que grupos de sitios del mismo tamaño de muestra, pero con diferente distribución espacial, pueden resultar en diferente CME. Más aún, el número de combinaciones de sitios, para cada uno de los tamaños de muestra, es enorme. Por ejemplo, si se tienen 79 sitios, es posible obtener 4.62527×10^{15} muestras con 19 sitios tomados al azar. Esto implica que el CME para el tamaño de muestra de 19 sitios, y los subsecuentes, tendría que ser el resultado de muestreos sucesivos de tamaño *n* repetidos múltiples veces a fin de contar con estimadores robustos del CME y su variabilidad. A su vez, esto implicaría que la muestra de validación de tamaño *m* se debería seleccionar con el mismo procedimiento. Para apoyar esto, existen métodos, como el denominado Monte Carlo, con los que se pueden realizar varias simulaciones y lograr lo anterior. Sin embargo, esta perspectiva

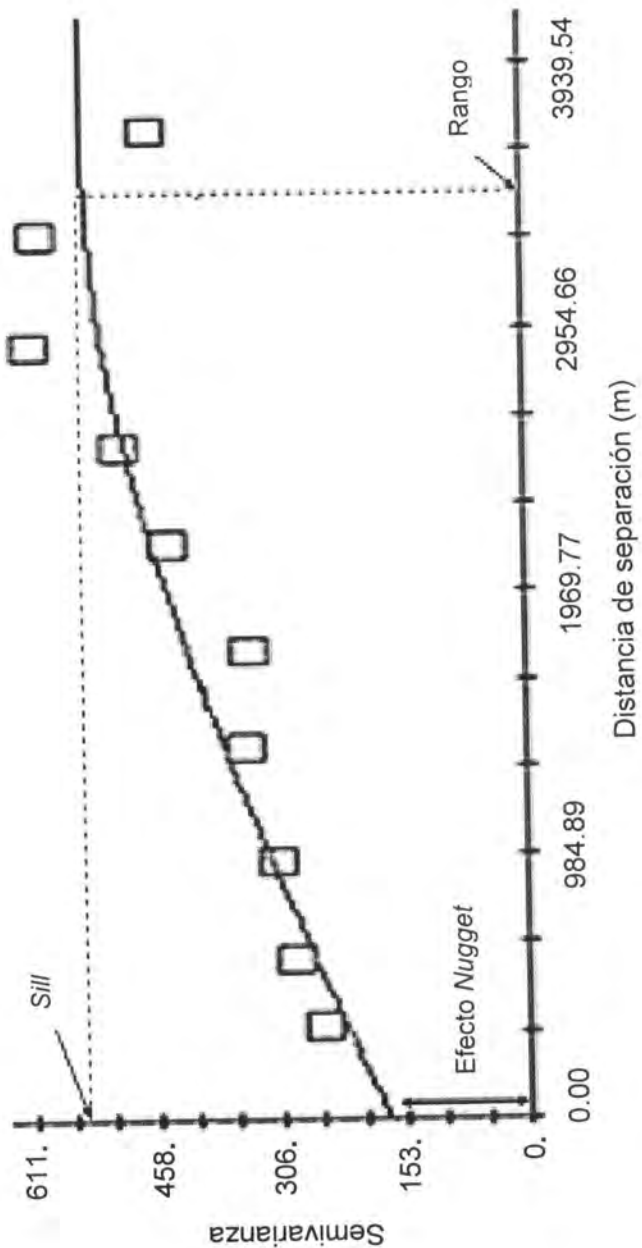


Figura 3. Variograma experimental para el tamaño de muestra de 59 sitios.

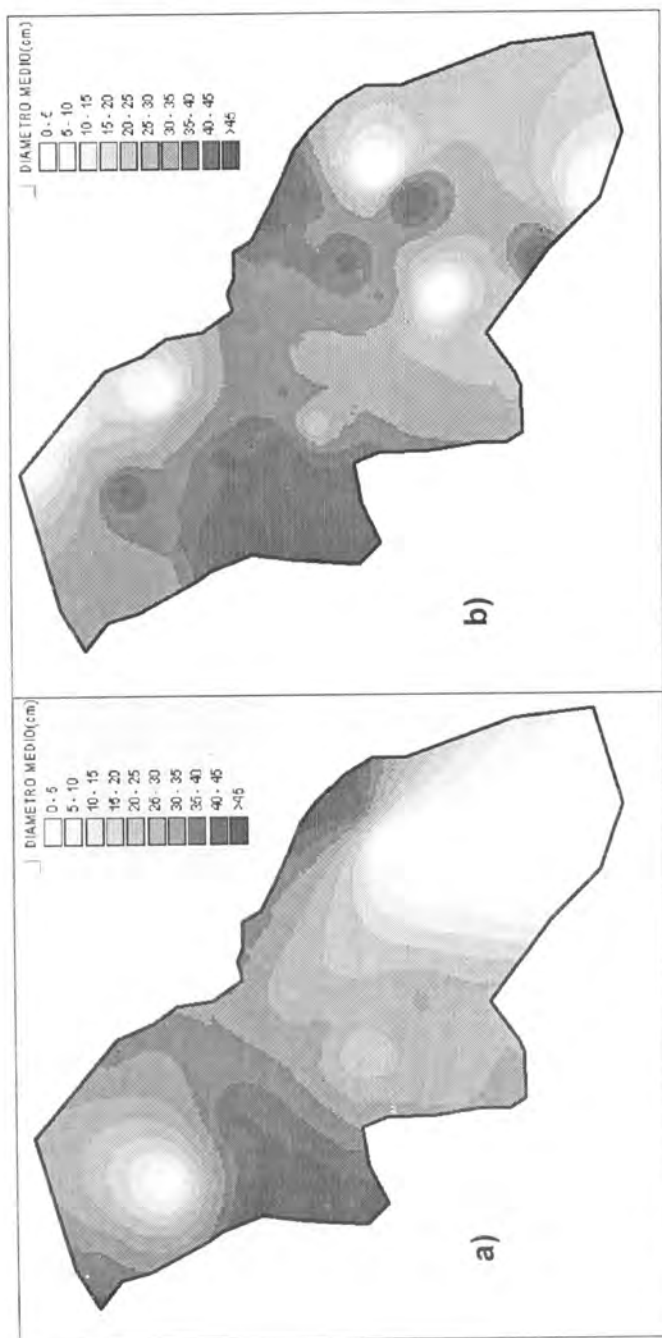


Figura 4. Interpolaciones con el menor cuadrado medio del error, usando kriging ordinario (KO) o distancia inversa ponderada (DIP), con base a los siguientes tamaños de muestra: a) 19 sitios (KO), b) 29 sitios (DIP). Los puntos denotan sitios de muestreo.

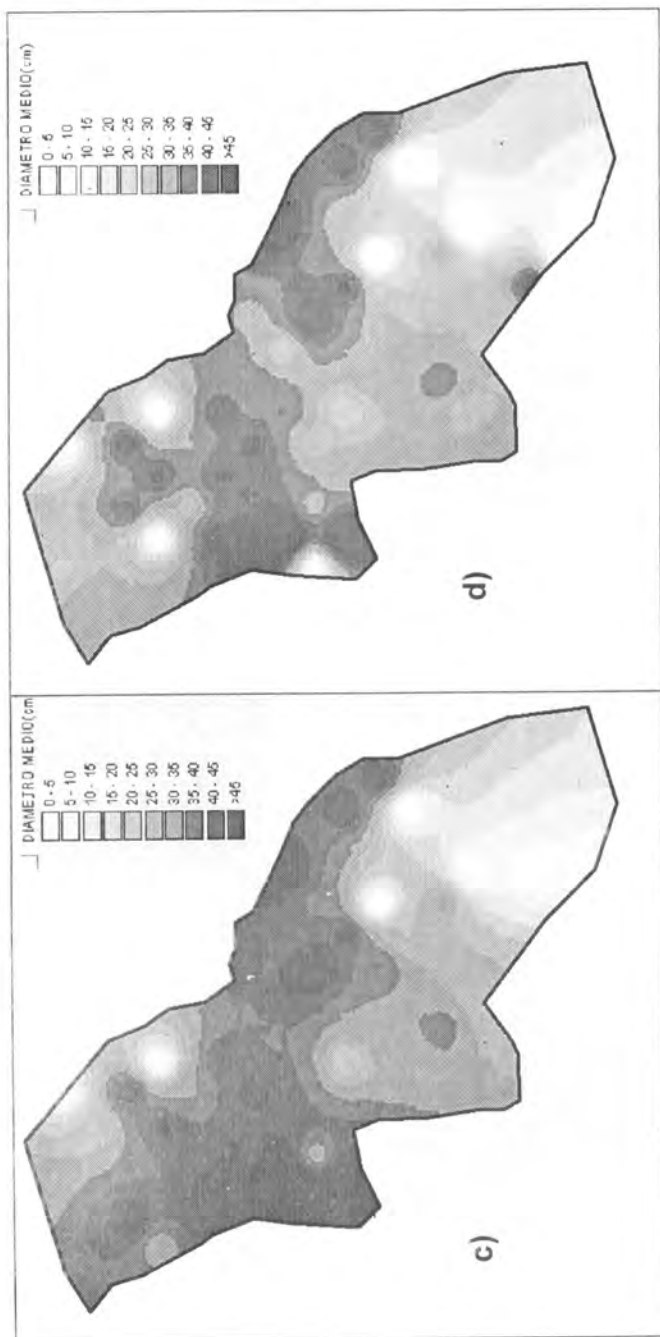


Figura 4. Interpolaciones con el menor cuadrado medio del error, usando kriging ordinario (KO) o distancia inversa ponderada (DIP), con base a los siguientes tamaños de muestra: c) 39 sitios (DIP), d) 49 sitios (DIP). Los puntos denotan sitios de muestreo.

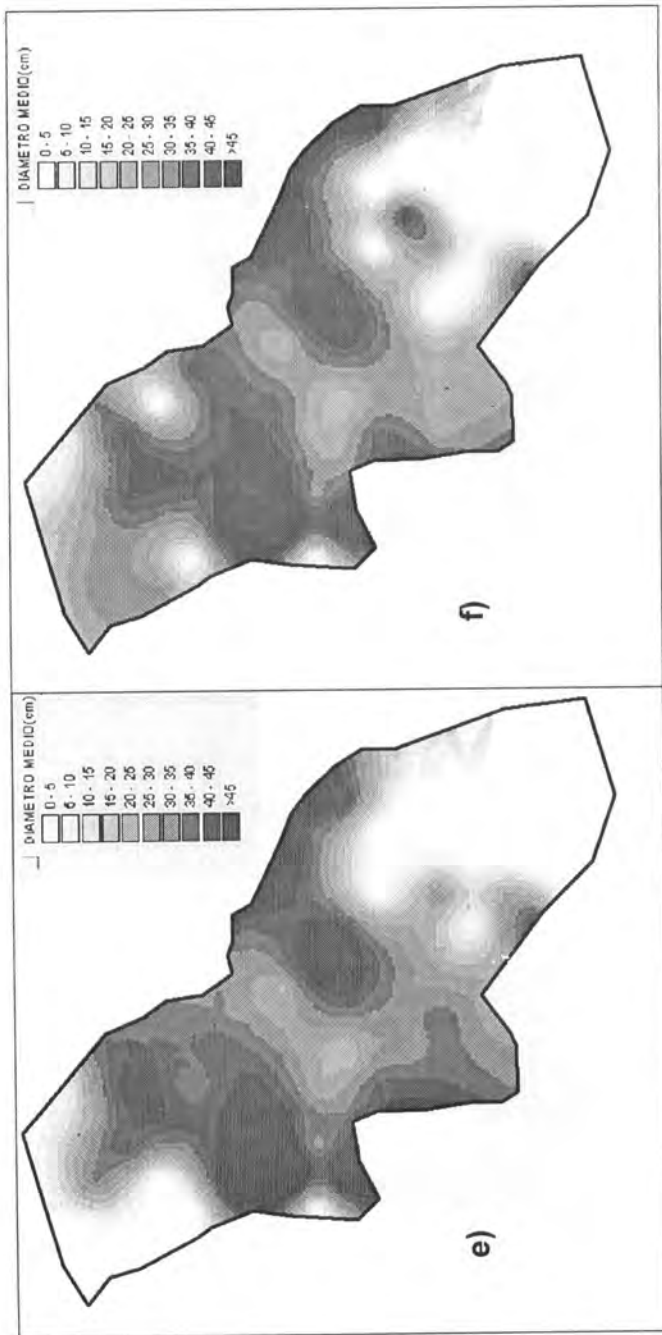


Figura 4. Interpolaciones con el menor cuadrado medio del error, usando kriging ordinario (KO) o distancia inversa ponderada (DIP), con base a los siguientes tamaños de muestra: e) 59 sitios (KO), f) 69 sitios (KO). Los puntos denotan sitios de muestreo.

Cuadro 2. Estadísticos de la variable diámetro medio, a la altura de pecho, en relación a diferentes tamaños de muestra.

Estadísticos	Tamaño de muestra					
	19	29	39	49	59	69
Media	24.90	33.56	33.95	32.67	30.60	30.84
Desviación estándar	17.60	20.35	19.25	18.83	19.87	19.07
Varianza de la muestra	309.71	414.28	370.69	354.68	394.66	363.65
Curtosis	-0.74	-0.59	-0.43	-0.47	-0.88	-0.72
Coefficiente de asimetría	-0.21	-0.39	-0.48	-0.42	-0.34	-0.40
Mínimo	0	0	0	0	0	0
Máximo	56	70	70	70	70	70
Suma	473.17	973.17	1324	1600.67	1805.43	2127.83

va más allá de los propósitos de este trabajo. No obstante, los resultados, aunque parciales, permiten apreciar la posible tendencia de las estimaciones del CME, tanto para KO como para DIP, además, de que pueden ser la base para estudios más profundos.

CONCLUSIONES

Con base en las condiciones establecidas en este trabajo, se rechaza la hipótesis nula que indica que no existe ninguna influencia en la precisión de las estimaciones de interpolación, debida a cambios en la intensidad de muestreo, ya que los resultados demuestran que a medida que se incrementó el tamaño de muestra, disminuyó el cuadrado medio del error. Es importante destacar que esta situación no fue permanente, ya que el menor cuadrado medio del error no ocurrió cuando la intensidad de muestreo fue la mayor.

Por otra parte, fue posible modelar la distribución espacial de la variable diámetro, lo que sugiere que las técnicas comparadas presentaron niveles de precisión similares en cada una de las intensidades de muestreo probadas; esto significa que se acepta la segunda hipótesis nula planteada, que señala que

la autocorrelación espacial de las variables forestales no es tan alta como para que la precisión de las estimaciones con técnica de interpolación geoestadística sean superiores a las basadas en la técnica de interpolación determinística. Es decir, los resultados indican que no hubo un incremento en la precisión de las estimaciones cuando se modeló la continuidad espacial (kriging) del diámetro. Incluso, en algunos casos, la técnica de distancia inversa ponderada fue ligeramente mejor que la técnica kriging ordinario.

El hecho de que DIP obtuvo los mejores resultados que las técnicas geoestadísticas puede ser debido a tres condiciones en general:

Primera: cuando los datos son abundantes, la mayoría de las técnicas de interpolación producen resultados similares (Burrough y McDonnell, 1998). Un supuesto de kriging es que los datos son escasos, lo cual concuerda con la máxima intensidad de muestreo probada en este proyecto (69 en un área de 1200 ha).

Segunda: las técnicas de kriging toman en cuenta qué tan agrupados están los sitios vecinos muestreados (Cressie, 1990). Por lo tanto, si los sitios vecinos no están fuertemente agrupados, todos los sitios podrían tener la misma ponderación (Flores, 2001). Esta condición ocurre en un diseño de muestreo sistemático.

Tercera: las técnicas de kriging asumen que las variables bajo análisis tienen una distribución normal (Hunner, 2000). En este proyecto, la variable diámetro no presentó una distribución normal, lo cual es una condición usual en este tipo de estudios (Weber y Englund, 1994).

El proceso de búsqueda de la "mejor" técnica de interpolación es iterativo (Flores y Omi, 2003). El nivel de complejidad es mayor en las técnicas geoestadísticas, porque no sólo tienen que ser definidos muchos parámetros con el propósito de producir el menor CME posible. Otro aspecto que se debe considerar es la facilidad de cada técnica. En el caso de la DIP, los procesos de análisis fueron más directos y menos complejos, mientras que el uso de kriging implica el entendimiento adecuado de cada uno de los parámetros que deben ser definidos previo a la ejecución de la interpolación. A pesar de que esto ya se ha automatizado en varios paquetes de información geográfica, no es recomendable generar superficies continuas sin conocer los procesos y criterios que se siguen.

Finalmente, no fue posible definir una técnica de interpolación única para todas las situaciones de intensidad de muestreo. Aunque en teoría las técnicas geoestadísticas se comportan mejor que las técnicas tradicionales (Isaaks y Srivastava, 1989), no ocurrió así en el caso de este trabajo. No obstante, el CME de las estimaciones podría ser reducido al ajustar el variograma experimental que resulte de algunos de los modelos (condicionalmente positivos) que existen,

por medio de la técnica cokriging, con las cuales se usan variables auxiliares que apoyan la estimación de la distribución espacial de una variable dada. Muchos estudios concuerdan en que la inclusión de variables auxiliares ha mejorado las estimaciones (Hunner, 2000; Phillips *et al.*, 1992). Por lo que en futuros trabajos se sugiere el uso de variables auxiliares para la estimación de la distribución espacial del diámetro, como lo son altura del arbolado, densidad, número total de especies, área basal total, altura media y cobertura media, altitud, exposición, pendiente, etc. La complejidad de este tipo de análisis sugiere presentar los resultados en otro artículo.

REFERENCIAS

- Al-Subaihi. 2000. Variable selection in multivariable selection using SAS/IML. <http://www.jstatsoft.org/v07/i12/mv.pdf>.
- Armstrong, M. 1998. Basic linear geostatistics. Springer Verlag, Co., New York, NY. 153 pp.
- Benavides S., J. de D. 1987. Estimación de la calidad de sitio mediante índices de sitio del *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede, para el A. D. F. Tapalpa, Estado de Jalisco. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México. 80 p.
- Burrough, P. A. and R. McDonnell. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. New York, NY. 333 p.
- Cressie, N. A. 1990. The origins of kriging. *Mathematical Geology*. 22(3):239-252.
- Chou, Y. H. 1992. Spatial autocorrelation and weighting functions in the distribution of wildfires. *International Journal of Wildland Fire* 2(4):169-176.
- Flores G., J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. Ph.D. Dissertation. Department of Forest Sciences. Colorado State University. Fort Collins, CO. USA. 184 p.
- Flores G., J. G. and P. N. Omi. 2003. Mapping forest fuels for spatial fire behavior simulations using geomatic strategies. *Agrociencia* 37(1):65-72.
- Hunner, G. 2000. Modeling forest stand structure using geostatistics, geographic information systems, and remote sensing. Ph.D. Dissertation. Department of Forest Sciences. Colorado State University. Fort Collins, CO. USA. 217 p.
- Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. New York, NY. 561 p.
- Journel, A. G. and C. J. Huijbregts. 1978. Mining Geostatistics, Academic Press, Inc. New York, NY. 600 p.
- Laslett, G. M., A. B. McBratney, P. J. Pahl and M. F. Hutchinson. 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science* 38:325-341.

- Matheron, G. 1978. Estimer et Choisir: essai sur la pratique des probabilités. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique. Fascicule 7. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 175 p.
- Oliver, M. A. and R. Webster. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 4(3):313-332.
- Phillips, D. L., J. Dolph and D. Marks. 1992. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 58:119-141.
- Potter, B. and J. Eenigenburg. 1999. Interpolation Techniques for Late-Spring Freeze Data. *Atmospheric Disturbance Climatology North Central Research Station Forestry Sci. Laboratory*. <http://climate.usfs.msu.edu/climatology/Freezemaps.html#idsw>.
- Samra, J. S., H. S. Gill and V. K. Bhatia. 1989. Spatial stochastic modeling of growth and forest resource evaluation. *Forest Science* 35(3):663-676.
- Starks T. H. and J. H. Fang. 1982. The effect of drift on the experimental semivariogram. *Mathematical Geology* 14 (4):309-319.
- Weber, D. D. and E. J. Englund. 1994. Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Mathematical Geology* 26(5):589-603.

PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES DEL NORTE DE MÉXICO

Felipa de Jesús Rodríguez Flores¹, José Ángel Prieto Ruiz²
y José de Jesús Návar Cháidez³

RESUMEN

La reforestación es importante para: la conservación de suelos, el restablecimiento del hábitat de la flora y la fauna, la recarga de los mantos acuíferos y la regulación del ciclo hidrológico, así como para la producción de oxígeno y la captura de carbono, entre otros efectos. La estimación de la biomasa en las áreas reforestadas es una forma de evaluar el amortiguamiento del cambio climático. En este contexto se midieron los parámetros dasométricos de los árboles plantados, el volumen de mantillo orgánico y necromasa, de 124 parcelas ubicadas en sitios degradados, incendiados o desprovistos de vegetación; se trabajó con 10 especies de pinos nativos en su mayoría, dos de las cuales están consideradas en la NOM 059 SEMARNAT 2001. El estudio se llevó a cabo en la Sierra Madre Oriental y en la Sierra Madre Occidental, en los estados de Durango, Coahuila y Nuevo León. Se estimaron los componentes de biomasa por árbol y parcela mediante ecuaciones alométricas desarrolladas para este propósito; se obtuvieron curvas de productividad de biomasa con el ajuste de modelos no lineales. Los resultados indican las potencialidades diferenciales de las especies y de los sitios para producir biomasa, a fin de recomendar su incorporación a programas de captura de carbono.

Palabras clave: Coahuila, Durango, Nuevo León, productividad de biomasa, reforestación, sitios degradados.

Fecha de recepción: 13 de mayo de 2005.

Fecha de aceptación: 29 de noviembre de 2005.

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Correo-e: jesu_rgz@hotmail.com

² Campo Experimental Valle del Guadiana, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP

³ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

ABSTRACT

Reforestation is important in soil conservation, as well as in the flora and fauna habitat restoration, aquifer recharge, hydrological cycle regulation, oxygen production and carbon sequestration, among other effects. Biomass estimation in reforested sites is a means to assess the climate change buffering. In this context, dasometric parameters of planted trees were measured as well as litter and necromass volume of 124 reforested sites located in degraded or, burned areas, or without any trees; 10 tree native species were assessed, two of which are listed in the Mexican red conservation book (NOM 059 SEMARNAT 2001). The research was carried out in the Mexican states of Durango, Coahuila, and Nuevo Leon on the territories that belong to the western and eastern Sierra Madre mountain ranges. Biomass components at tree and site level were estimated through allometric equations derived for this purpose; productivity curves by fitting non linear models to biomass and age of reforestation were obtained. Results show biomass productivity by site and species with the aim to recommend them for carbon sequestration programs.

Key words: Coahuila, Durango, Nuevo Leon, biomass productivity, reforestation, degraded sites.

INTRODUCCIÓN

México es un país con un alto potencial para el desarrollo de plantaciones forestales, pues se estima que existen 8.1 millones de hectáreas con gran variabilidad de climas y suelos que pueden alcanzar altos valores de productividad (CONAFOR, 2004).

Si bien el aumento de la demanda de fibras, celulosa y de los derivados de madera ha propiciado la incorporación de especies de rápido crecimiento, los programas gubernamentales nacionales y los esfuerzos locales tienden a realizar plantaciones en ecosistemas forestales degradados, incendiados y que por causas antropogénicas y/o naturales están perdiendo su eficiencia productiva (Mesera, 1996).

Este tipo de reforestaciones desempeña un papel importante en la captura de bióxido de carbono a través de la acumulación de la biomasa de hojas, ramas, fuste, raíces, mantillo orgánico, necromasa y suelos, pues almacenan el carbono y disipan el oxígeno hacia la atmósfera en el proceso fotosintético (Brown, 1997). Lo anterior sucede a una tasa mayor que el ecosistema natural por sus características de alta densidad a los 10-15 años de edad y por la pronta disponibilidad de planta, en contraste con la regeneración natural (Návar *et al.*, 2001).

En México existen pocos estudios de producción de biomasa en plantaciones forestales o en sitios reforestados y en consecuencia de los servicios ambientales que proporcionan (Návar *et al.*, 2004). Sin embargo, con los incentivos gubernamentales nacionales e internacionales que se están otorgando por conducto de los instrumentos económicos como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) propuesto en el Protocolo de Kyoto, el Banco Mundial y las propuestas de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) se abre la posibilidad de establecer plantaciones forestales, reforestar sitios degradados, y realizar prácticas de forestación, entre otros, con fines de captura de bióxido de carbono y de amortiguamiento del cambio climático que resultan en el aprovechamiento sostenible del recurso forestal.

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de estimar los componentes de biomasa en la vegetación (hojas, ramas, fuste, raíces, mantillo orgánico y necromasa), de desarrollar curvas de productividad y recomendar especies para reforestar áreas en los cuales se proponga la densidad de biomasa con el propósito de establecer proyectos de servicios ambientales en el norte de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en sitios reforestados de la Sierra Madre Occidental en Durango, y de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León y Coahuila, México (Figura 1).

La información se obtuvo de 38 parcelas de Durango establecidas para restauración y protección. En Nuevo León se tomaron datos de 46 parcelas plantadas, con fines de investigación, dos de las cuales corresponden a ensayos de procedencia. En Coahuila, se levantaron de 40 parcelas en 8 áreas reforestadas en la Sierra de Zapalinamé. Las especies y localización de las plantaciones evaluadas se presentan en el Cuadro 1.

La mayor parte de las áreas reforestadas tienen características fisiográficas, climáticas y de suelos diferentes. El clima de las regiones del estado de Durango es templado frío, con precipitación y temperatura promedio anual de 900 mm y 15°C, respectivamente. Comprende varios tipos de suelo, de los cuales predominan cambisoles, litosoles, feozems y regosoles (González, 2001).

En las regiones estudiadas de Nuevo León prevalece el clima semiseco, con precipitación media anual de 600 mm y temperatura media anual de 17°C. Los suelos son someros del tipo litosol, rendzina y regosol calcáreo (Woerner, 1990).

Las áreas evaluadas en el estado de Coahuila se presentan en clima seco,

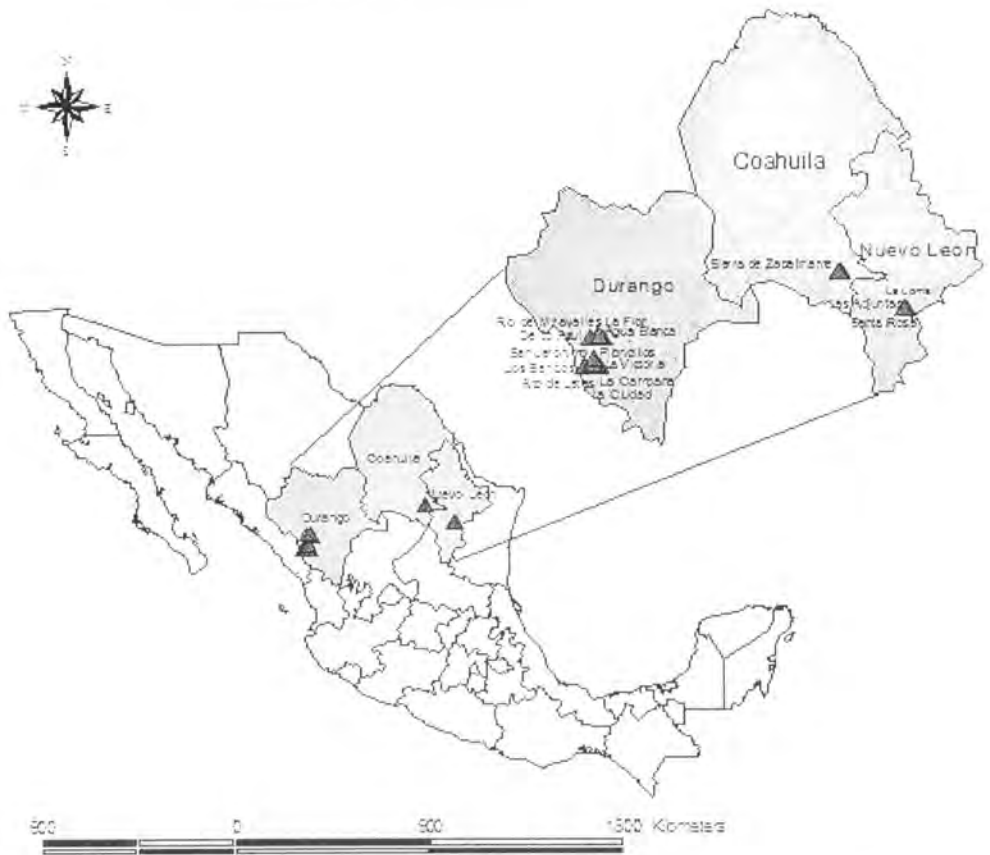


Figura 1. Ubicación de los sitios estudiados en el Norte de México.

con precipitación media anual de 350 mm y temperatura media anual de 18°C, respectivamente, y con suelo xerosol cálcico (Oviedo, 1980).

Diseño de muestreo

Para este trabajo de investigación se consideraron las áreas reforestadas con edades entre uno y 43 años. Ahí se establecieron parcelas al azar de 20 x 20 m, que fueron delimitadas con cintas métricas Perfoparts de fibra de vidrio de 50 m con cruceta, cuya ubicación se registró mediante coordenadas geográficas utilizando el sistema de posicionamiento global (GPS Garmin 12XL). En cada

Cuadro 1. Especies y localización de las plantaciones muestreadas en el Norte de México.

Especie	Estado	Municipio	Predio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Número de parcela		
<i>Pinus cooperi</i> Blanco	Durango	Pueblo Nuevo	La Campana	23°46'47"	105°32'30"	2780	4		
<i>P. engelmannii</i> Carr. y <i>P. durangensis</i> Mart.			San Jerónimo	23°50'24"	105°53'13"	2752	4		
<i>P. cooperi</i> Blanco			Los Bancos	23°41'39"	105°43'18"	2710	4		
			La Victoria	23°46'42"	105°32'30"	2780	6		
			Alto de Latas	23°43'43"	105°31'13"	2849	4		
			Piloncillos	23°44'34"	105°46'79"	2685	2		
<i>P. cooperi</i> Blanco, <i>P. arizonica</i> Engel. y <i>P. durangensis</i> Mart.			San Dimas	La Ciudad	23°77'46"	105°53'81"	2800	8	
<i>P. engelmannii</i> Carr.					Agua Blanca	24°25'27"	105°47'37"	2542	3
					Cielito Azul	24°21'53"	105°39'56"	2748	1
<i>P. cooperi</i> Blanco			San Dimas	Miravalles	24°20'04"	105°59'36"	2583	1	
	La Flor	24°26'28"			105°42'03"	2499	1		

continúa...

continuación Cuadro 1

<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.			Santa Rosa	24°41'56"	99°51'37"	1562	2
<i>P. nelsonii</i> Shaw., <i>P. pinceana</i> Gord & Glend., <i>P. cembroides</i> Zucc.			La Loma	24°42'25"	99°51'50"	1562	21
<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	Nuevo León	Iturbide	La Loma 1	24°41'59"	99°51'13"	1562	1
<i>Cupressus arizonica</i> Greene*			La Loma 1	24°41'59"	99°51'13"	1562	1
<i>P. nelsonii</i> Shaw., <i>P. pinceana</i> Gord. & Glend. y <i>P. cembroides</i> Zucc.*			Las Adjuntas	24°69'89"	99°86'03"	1562	21
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 1	25°32'14"	101°03'79"	1820	5
			Area 2	25°34'61"	101°01'59"	1780	5
			Area 8	25°34'41"	101°03'16"	1820	4
			Area 11	25°33'69"	101°01'82"	1820	6
			Area 13	25°33'39"	101°02'44"	1820	5
			Area 14	25°33'99"	101°03'25"	1820	5
			Area 15	25°34'32"	101°03'45"	1780	5
			Area 16	25°34'71"	101°01'84"	1871	5

*Ensayo de procedencia.

una se determinó su exposición, la densidad forestal y la supervivencia de individuos por conteo de los árboles vivos, con respecto al total de los plantados originalmente. A todos se les midió el diámetro basal, con una forcípula de aluminio Haglöf con una graduación de 80 cm, la altura total y la cobertura de copas, que sólo fue a 10 individuos, utilizando una regla Hetsa de 50 cm y una cinta graduada Perfoparts de 30 m.

Dentro de las parcelas se seleccionaron tres subparcelas (sitios) de 1 m² al azar, de donde se recolectó toda la biomasa acumulada (mantillo y necromasa al ras del suelo) y se pesó en balanza graduada digital Ohaus de 4100 g con precisión de 10 mg. Se tomó una muestra de ramas y hojarasca que se guardaron en bolsas de papel, y se llevaron al laboratorio para obtener el peso seco. Para lo cual se colocaron en una estufa eléctrica de la serie ORLS de 700 mm de ancho x 500 mm de alto, con temperatura de trabajo de 200 a 104°C para determinar la relación de peso seco y peso húmedo, y con ello, el contenido de biomasa seca en cada compartimiento. En la estimación de la biomasa por componentes, se utilizaron las ecuaciones alométricas citadas por Nívar *et al.* (2004) (Cuadro 2).

Estimación de biomasa aérea y raíces

Para estimar la biomasa aérea en las plantaciones del estado de Durango se emplearon ecuaciones lineales y no lineales, de acuerdo a la metodología desarrollada por Nívar (2001). La biomasa total del árbol se calculó por medio de las siguientes ecuaciones:

Pinus cooperi [1]

P. engelmannii [2]

P. durangensis [3]

Otras especies [4]

En el estado de Nuevo León se usó la ecuación [5] para *P. pseudostrobus*, *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. pinceana*; en el estado de Coahuila se utilizó la ecuación [4] (Cuadro 2).

En estas ecuaciones no se incluyó la biomasa de raíces, pues se desarrollaron y ajustaron a la regresión no lineal considerando las variables de diámetro y altura promedio de la plantación. En cada una de las regiones se aplicó una ecuación para las raíces: la [6] para las plantaciones ubicadas en la Sierra Madre Occidental y la [7] para las de la Sierra Madre Oriental (Cuadro 2).

Cuadro 2. Ecuaciones para estimar biomasa aérea y de raíces, sugeridas por Nívar et al. (2001).

Ecuación No.	Biomasa Aérea
1	$BtPc = [(-13.9108 - 0.0014db^2h + 19.669Ldb - 4.9704Lh) + 25.4210 + 2.58648db - 50.1084Ldb] + (-0.24462 + 0.009397db^2h)$
2	$BtPe = [(10.0098 + 1.4498db - 9.1305Ldb^2h) + (-1.7333 + 0.007146db^2h) + (4.2778 - 0.6922db + 0.01424db^2h)]$
3	$BtPd = [(3.3299 + 0.7384db - 3.6282Ldb^2h) + (0.2517 + 0.00298db^2h) + (-0.2452 + 0.009172db^2)]$
4	$BtE = [(-1.13 + 0.353D - 0.54LH) + (9.413 + 1.605D - 10.3LD) + (0.93 + 0.009D^2H)]$
5	$BPcnp = [(0.0151(db)^{2.6135}) + (0.00459(db)^{1.9106}) + (0.00211(db)^{1.9794})]$
Biomasa de Raíces	
6	$Br = [(0.0077(DH)^{0.9688})]$
7	$Br = [(0.0051(D)^{0.8306})]$

db = diámetro a la base (cm), h = altura (m), L = logaritmo base 10, Bt = biomasa total del árbol (hojas + ramas + fuste) (kg/árbol⁻¹), Br = Biomasa raíces, H = altura, D = diámetro, Pc = *Pinus cooperi*, Pd = *Pinus durangensis*, Pe = *Pinus engelmannii* y Pcpn = otras especies (*P. cembroides*, *P. nelsonii*, *P. pinceana*, *P. pseudostrabus*), E = otras especies en Durango.

La biomasa total de hojas, ramas, fuste y raíces por hectárea para cada sitio resultó de la suma de todos los valores de cada compartimento mencionado de los árboles en la parcela, valor total que se multiplicó por 10,000 m² y se dividió por el área de cada parcela.

Estimación de biomasa del mantillo y la necromasa

El cálculo de la biomasa del mantillo orgánico y la necromasa se hizo con base en el promedio de la suma del peso seco de los subcomponentes hojas y ramas; para efectos de biomasa total, se interpolaron los datos por hectárea.

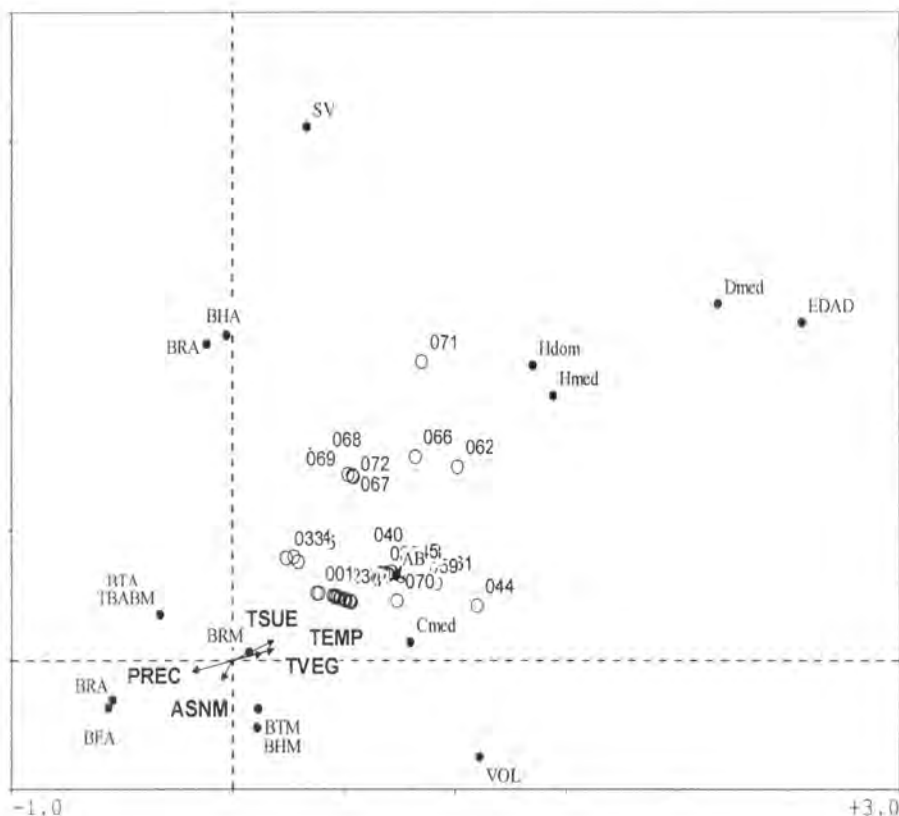
Análisis estadístico

Con los datos de las variables dasométricas y físicas de las plantaciones forestales se realizó una prueba de gradiente directo mediante el análisis estadístico multivariado de correspondencia canónica sin tendencia (DCCA), con el fin de obtener las tendencias y los grupos de cada una de las variables medidas, relacionarlos o diferenciarlos, y con ello determinar los modelos más adecuados para estimar la productividad de las plantaciones evaluadas. Una vez definidos los grupos, se generaron las curvas de productividad con el ajuste de ecuaciones no lineales a los datos de edad y biomasa total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantaciones se localizaron en condiciones heterogéneas de fisiografía, suelo y clima. El análisis estadístico aplicado a la información procedente de todas las áreas reforestadas mostró la necesidad de desarrollar los índices de productividad para cada una de las regiones estudiadas. Las diferencias pudieron explicarse por la diversidad de especies encontradas, y por los contrastes entre los sitios a partir de las características de cada región forestal. Además, la presencia de taxa nativas y exóticas modifica los niveles de productividad entre las especies forestales consideradas (Figura 2).

En el análisis estadístico se presenta una dispersión amplia entre las plantaciones muestreadas. A pesar de esta variación se pudieron aislar adecuadamente los grupos de plantaciones por los estados representados (Durango, Coahuila y Nuevo León). La precipitación y la temperatura responden por parte de la varianza de distribución de los sitios. Los de la Sierra Madre Occidental en Durango reciben una mayor precipitación y son los de mayor productividad, como se demuestra en las variables de biomasa (BRA, BRM, BFA, BHM, BRM, BTM y TBABM). Los correspondientes a las regiones de Nuevo León y Coahuila tienen las precipitaciones más bajas, y por lo tanto, su biomasa es menor.



TSUE = Tipo de suelo, TVEG = Tipo de vegetación, PREC = Precipitación, TEMP = Temperatura, ASNM = Altitud sobre el nivel del mar, BHA = Biomasa hojas área, BRA = Biomasa ramas aérea, BRA = Biomasa raíces, BTA = Biomasa total aérea, BRM = Biomasa ramas mantillo, BHM = Biomasa hojas mantillo, BTM = Biomasa total mantillo, TBABM = Biomasa total área y mantillo, Dmed = diámetro medio, Hdom = Altura dominante, EDAD = edad, Hmed = Altura media, Cmed = Cobertura media, AB = área basal, VOL = Volumen, 001-038 = parcelas de la Sierra Madre Occidental en Durango (Pueblo Nuevo y San Dimas); 039-041 = parcelas de La Sierra Madre Oriental de Nuevo León (Iturbide) y 042-078 parcelas de Coahuila (Sierra de Zapalinamé).

Figura 2. Análisis estadístico multivariado de análisis de correspondencia canónica sin tendencia (DCCA) aplicado a datos de las parcelas muestreadas en el norte de México.

La temperatura, a su vez, se asocia esencialmente de forma inversa con la precipitación. Es decir, en los sitios que se localizan en la parte alta de las regiones de Durango se registraron temperaturas menores, mientras que en los que están

en las vertientes de la Sierra Madre Oriental, las temperaturas anuales promedio son más altas. Con estos datos se definió un modelo para cada región, pues no existe ninguna similitud entre sus tendencias ni grupos entre sus variables (Figura 2).

Productividad de las plantaciones evaluadas

Las plantaciones evaluadas en la parte alta de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango alcanzan un rango de productividad de biomasa entre 6 a 295 Mg ha⁻¹ (Figura 3; Cuadro 3). En las plantaciones de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, dicha variable se encuentra dentro de un rango de 0 a 71 Mg ha⁻¹ (Figura 4; Cuadro 4) y en Coahuila oscila de 0 a 64 Mg ha⁻¹ (Figura 5; Cuadro 5).

La productividad de biomasa en las regiones evaluadas del Norte de México se determinó por las diferentes condiciones fisiográficas de cada una de las áreas reforestadas, de las características de las especies plantadas y la edad de la plantación (Cuadros 3, 4 y 5).

A pesar de que *Pinus engelmannii* se localiza fuera de su rango de distribución, que es un poco más cercano a la región oriental de la Sierra Madre Occidental, por lo general crece abajo de los 2400 m y desarrolla niveles de productividad media en áreas con tratamiento silvícola de eliminación de especies competidoras y podas. Sin embargo, donde no se ha hecho ninguna práctica silvícola y en condiciones fuera de su intervalo natural, su productividad es baja con respecto a la de las especies nativas de la región (Figura 3).

Pinus arizonica pertenece a territorios ubicados más al norte del Estado; crece en sitios pobres, poco profundos, pedregosos con poco drenaje, y en pequeños bajíos (Piloncillos y San Jerónimo) presenta productividad baja o muy baja, especialmente en comparación con los taxa propios del lugar (Figura 3).

Productividad en plantaciones del estado de Nuevo León

En el estado de Nuevo León, *Pinus pseudostrobus* alcanzó la mayor productividad. La plantación está en una loma que se caracteriza por tener suelos de 20 cm de profundidad, pedregosos, con poca materia orgánica y moderadamente drenados (Figura 4).

Pinus cembroides muestra un intervalo muy amplio de productividad, pero a pesar de ser menor a la de *P. pseudostrobus*, ambas especies crecen en las mismas condiciones ecológicas. En localidades similares se registran valores intermedios y muy bajos, posiblemente por factores climáticos adversos, heladas y

Cuadro 3. Productividad de biomasa por región, especie y edad de la plantación en el estado de Durango.

Plantaciones de Durango						Biomasa Arbórea (Mg ha ⁻¹)					
Loc.	Predio	Especie	D.	Edad	Fuste	Ramas	Hojas	Raíces	Nec.		
1	Los Bancos	<i>Pinus cooperi</i>	4050.00	17	38.197	14.662	8.509	25.713	14.216		
2			3075.00	17	42.292	23.605	7.928	24.405	14.750		
3			3675.00	17	73.118	18.144	3.113	44.683	11.607		
4			1350.00	17	41.508	13.125	1.297	26.408	15.813		
5	La Campana	<i>Pinus cooperi</i>	1250.00	21	75.359	19.257	1.038	46.122	16.311		
6			3450.00	21	24.892	8.063	1.530	16.983	23.679		
7			925.00	21	47.606	14.197	0.606	29.763	27.513		
8			1625.00	21	35.801	10.047	1.569	23.038	22.305		
9	La Ciudad	<i>P. arizonica</i>	3511.11	19	15.589	7.100	4.502	10.727	5.966		
10		<i>P. durangensis</i>	711.11	19	32.718	10.821	3.272	20.817	5.966		
11		<i>P. cooperi</i>	1200.00	19	35.282	10.908	0.275	22.598	5.201		
12		<i>P. arizonica</i>	3033.33	19	7.182	4.181	2.282	4.937	8.152		
13	La Victoria	<i>P. cooperi</i>	1966.66	19	11.058	5.910	3.032	7.502	8.152		
14			2200.00	19	46.114	15.985	3.522	30.584	9.717		
15			4166.66	19	42.579	14.901	3.283	27.480	8.093		
16			3777.77	19	13.849	4.831	1.515	53.003	23.505		
17	La Victoria	<i>P. cooperi</i>	2175.00	20	33.751	10.590	3.009	22.066	12.958		
18			950.000	20	30.240	12.020	2.319	19.272	17.078		

continúa...

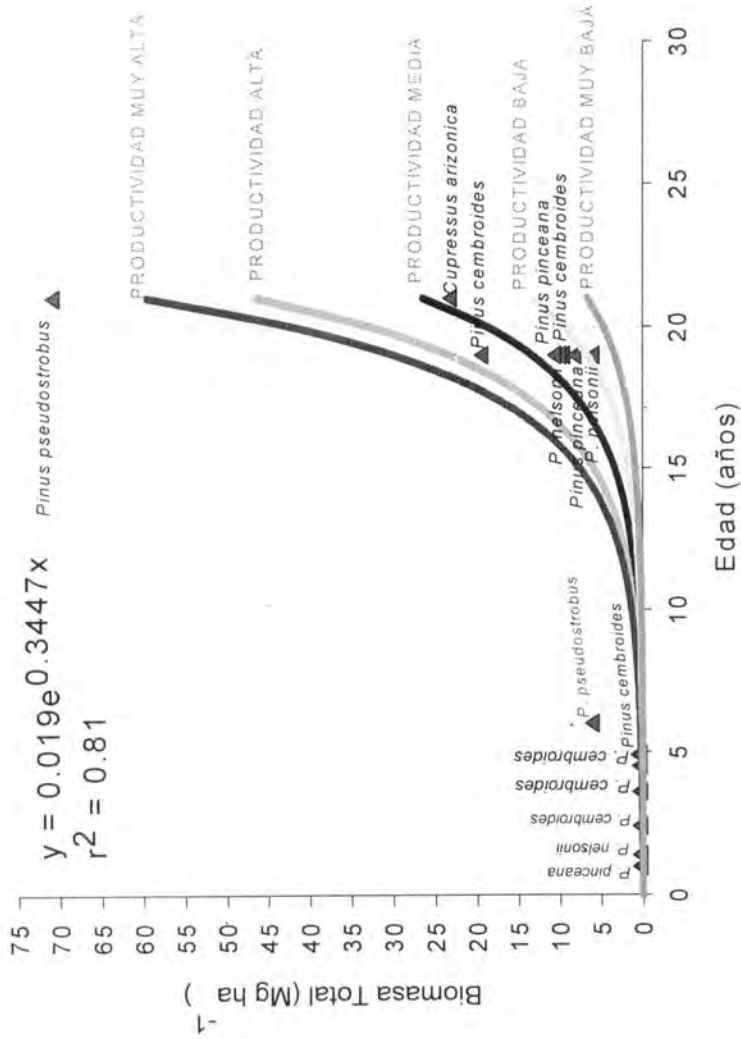


Figura 4. Curvas de productividad de biomasa en plantaciones de Nuevo León.

Cuadro 4. Productividad de biomasa por región, especie y edad de la plantación en el estado de Nuevo León.

Loc	Plantaciones de Nuevo León		Biomasa Arbórea (Mg ha ⁻¹)							
	Predio	Especie	D.	Edad	Fuste	Ramas	Hojas	Raíces	Nec.	
1	Santa Rosa 1	<i>P. pseudoostrobus</i>	4050	6	4.14	0.340	0.177	0.053	1.12	
2	Santa Rosa 2		3075	6	4.44	0.313	0.166	0.039	0.82	
3	La Loma		3675	21	42.52	1.699	0.951	0.089	25.24	
4		<i>Cupressus arizonica</i>	1350	21	19.434	0.952	0.523	0.069	1.907	
5	Las Adjuntas	<i>P. cembroides</i>	9966	1	0.006	0.004	0.002	0.018	0.001	
6			9796	1.4	0.006	0.004	0.002	0.018	0.001	
7			9558	2.4	0.006	0.004	0.002	0.018	0.002	
8			9320	3.6	0.012	0.007	0.003	0.022	0.002	
9			9048	4.5	0.017	0.009	0.004	0.024	0.003	
10			8776	4.9	0.036	0.016	0.007	0.030	0.006	
11			7143	19	6.637	0.666	0.341	0.135	1.476	
12	<i>P. nelsonii</i>		9898	1	0.002	0.002	0.001	0.012	0.001	
13			9082	1.4	0.002	0.002	0.001	0.012	0.001	
14			7041	2.4	0.003	0.002	0.001	0.014	0.001	
15			5952	3.6	0.004	0.003	0.001	0.016	0.001	
16			5408	4.5	0.008	0.005	0.002	0.019	0.002	
17			5170	4.9	0.021	0.010	0.005	0.025	0.004	
18			4456	19	4.066	0.466	0.236	0.115	0.826	
19			10000	1	0.006	0.004	0.002	0.018	0.001	
20	9830	1.4	0.006	0.004	0.002	0.018	0.001			
21	9456	2.4	0.007	0.005	0.002	0.018	0.002			
22	8912	3.6	0.012	0.007	0.003	0.022	0.002			
23	8571	4.5	0.019	0.010	0.004	0.025	0.003			

continúa...

continuación Cuadro 4

24	Las Adjuntas	<i>P. pinceana</i>	8333	4.9	0.037	0.016	0.007	0.030	0.006
25			5374	19	5.656	0.593	0.302	0.128	1.221
26			9966	1	0.065	0.025	0.011	0.039	0.010
27			9796	1.4	0.064	0.024	0.011	0.038	0.010
28			8980	2.4	0.057	0.022	0.010	0.035	0.008
29		<i>P. cembroides</i>	8946	3.6	0.078	0.027	0.012	0.038	0.011
30			8742	4.5	0.112	0.036	0.016	0.042	0.016
31			8742	4.9	0.219	0.058	0.027	0.052	0.032
32			5918	19	13.81	1.082	0.568	0.150	3.514
33			9864	1	0.012	0.007	0.003	0.023	0.002
34			8810	1.4	0.011	0.007	0.003	0.021	0.002
35			6633	2.4	0.008	0.005	0.002	0.015	0.001
36	La Loma	<i>P. nelsonii</i>	6667	3.6	0.011	0.006	0.003	0.017	0.002
37			6361	4.5	0.018	0.009	0.004	0.019	0.003
38			6259	4.9	0.042	0.016	0.007	0.025	0.006
39			3878	19	7.165	0.598	0.312	0.091	1.568
40			9966	1	0.001	0.001	0.000	0.008	0.000
41			9626	1.4	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000
42			8946	2.4	0.000	0.001	0.000	0.007	0.000
43		<i>P. pinceana</i>	8503	3.6	0.002	0.002	0.001	0.011	0.001
44			8537	4.5	0.006	0.004	0.002	0.016	0.001
45			8571	4.9	0.014	0.008	0.003	0.021	0.002
46			5782	19	7.472	0.686	0.355	0.121	1.681
	Promedio		7668.11	5.97	2.53	0.17	0.09	0.04	0.86
	Desviación Estándar		2232.49	6.45	7.18	0.36	0.19	0.04	3.74
	Intervalo de Confianza		645.15	1.86	2.07	0.10	0.06	0.01	1.08

Loc. = localidad; D. = densidad; Nec. = necromasa.

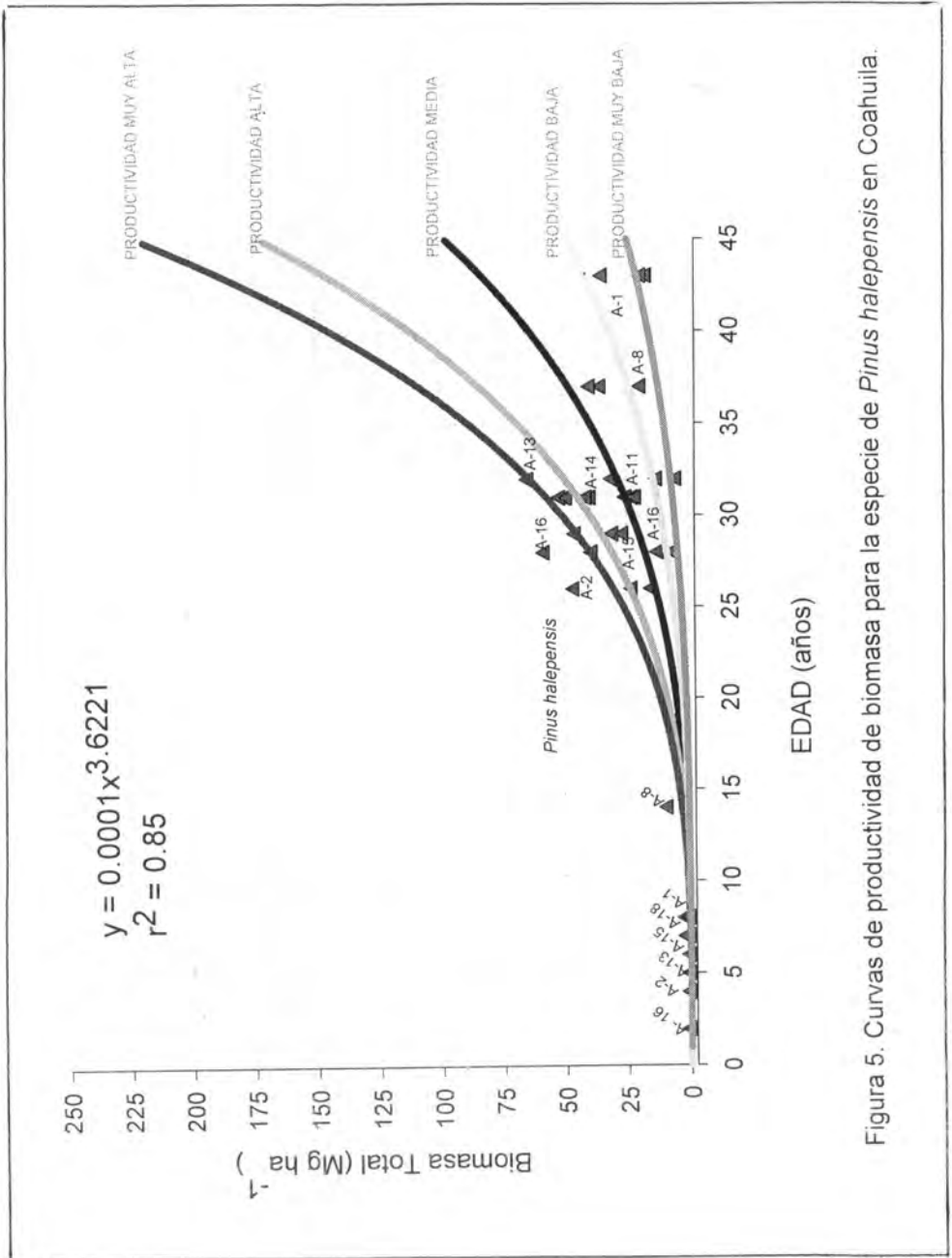


Figura 5. Curvas de productividad de biomasa para la especie de *Pinus halepensis* en Coahuila.

Cuadro 5. Productividad de biomasa área de plantación, especie y edad de la plantación en el estado de Durango.

		Plantaciones de Coahuila				Biomasa Arbórea (Mg ha ⁻¹)					
Loc	Predio	Especie	D.	Edad	Fuste	Ramas	Hojas	Raíces	Nec.		
1	Área 1-Zapalinamé	<i>P. halepensis</i>	875	43	8.831	5.355	2.791	5.921	11.044		
2			381	43	4.737	3.244	1.583	3.190	3.537		
3			69	43	6.821	1.930	0.659	4.353	4.761		
4	150		26	3.197	1.452	0.652	2.124	6.986			
5	Área 2-Zapalinamé		300	26	6.528	4.109	1.752	4.338	5.615		
6			575	26	13.144	6.284	2.648	8.669	14.865		
7	Área 8-Zapalinamé		206	37	11.636	4.505	1.643	7.538	9.432		
8			150	37	6.145	2.832	1.085	4.026	4.563		
9			675	37	13.988	6.719	3.032	9.319	5.883		
10	Área 11-Zapalinamé		300	31	21.769	7.475	2.630	13.864	3.172		
11		425	31	21.106	7.516	2.853	13.564	6.078			
12		425	31	10.370	4.542	1.959	6.861	0.955			
13	Área 13-Zapalinamé	275	31	10.071	4.154	1.621	6.534	2.080			
14		475	31	8.986	3.666	1.676	5.948	1.634			
15	Área 14-Zapalinamé	181	32	5.167	2.175	0.914	3.403	0.610			
16		294	32	0.755	0.655	0.483	0.518	2.253			
17		700	32	28.797	9.703	3.889	18.871	2.643			
18	Área 14-Zapalinamé	550	32	11.449	5.840	2.586	7.632	2.707			
19		725	31	20.669	8.700	3.655	13.613	1.569			
20		525	31	16.052	7.085	2.927	10.566	2.221			

continúa...

continuación Cuadro 5.

21	Área 15-Zapalinamé	525	31	17.107	6.849	2.806	11.226	2.456
22	Área 14-Zapalinamé	350	31	5.941	3.072	1.448	3.978	6.341
23	Área 15-Zapalinamé	550	29	9.660	5.668	2.594	6.463	5.585
24		625	29	17.134	9.092	3.762	11.324	3.599
25		675	29	9.106	6.999	3.302	6.131	4.210
26		775	29	8.218	4.807	2.557	5.567	4.708
27	Área 16-Zapalinamé	450	28	21.563	8.201	3.119	13.962	10.629
28		350	28	15.663	5.536	2.182	10.031	4.831
29		306	28	3.374	2.631	1.255	2.272	2.310
30		294	28	1.417	1.056	0.638	0.968	2.023
31	Área 1-Zapalinamé	236	19	0.772	0.055	0.029	0.007	1.617
32	Área 2-Zapalinamé	183	2	0.003	0.001	0.000	0.001	0.000
33	Área 5-Zapalinamé	617	8	0.283	0.034	0.017	0.009	1.247
34	Área 8-Zapalinamé	275	14	4.814	0.219	0.121	0.013	2.054
35	Área 11-Zapalinamé	315	7	0.022	0.004	0.002	0.003	0.000
36	Área 13-Zapalinamé	380	8	0.038	0.007	0.003	0.004	0.000
37	Área 15-Zapalinamé	559	7	0.239	0.030	0.015	0.008	1.160
38		340	5	0.003	0.001	0.000	0.001	0.000
39	Área 16-Zapalinamé	363	4	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
40	Área 18-Zapalinamé	300	6	0.004	0.001	0.001	0.001	0.000
Promedio		418.10	25.83	8.64	3.81	1.62	5.57	3.63
Desviación Estándar		192.42	11.45	7.60	3.07	1.27	5.03	3.37
Intervalo de Confianza		55.60	3.31	2.20	0.89	0.37	1.45	0.97

Loc. = localidad; D. = densidad; Nec. = necromasa.

repentinos cambios de temperatura (Figura 4). No obstante que estos árboles se ubican en sitios con suelos profundos, su rendimiento es muy pobre; son plantaciones que se tenían como ensayos de procedencia y se les daba seguimiento en su desarrollo para fines de investigación (Dominguez y Nívar, 2000).

Cupressus arizonica se localiza fuera de su rango de distribución; sin embargo, su nivel de productividad fue medio en presencia de suelos poco profundos, calichosos, con poca humedad, y materia orgánica, pero se ha logrado adaptar a las características medioambientales prevalecientes en el área (Figura 4).

Pinus pinceana y *P. nelsonii* crecen en lugares pobres, degradados, pedregosos, con suelos someros y una humedad relativamente baja; su productividad es entre media y muy baja, lo que probablemente obedece a una difícil adaptación, pues son especies introducidas (Figura 4). Cuando alcanzan una edad de 20 años en la parte baja de la Sierra, donde los suelos son un poco más profundos, se puede advertir la presencia de semillas comestibles, aunque son escasas.

Productividad en plantaciones del estado de Coahuila

Aun cuando *Pinus halepensis* es una especie originaria de las costas central y oeste del Mediterráneo, se introdujo en el estado de Coahuila para fines de reforestación en áreas degradadas y de protección a la Cuenca de la Sierra de Zapalinamé.

Las características edafológicas y climáticas de la región, que son semejantes a las originales, permitieron el establecimiento de la plantación, misma que desafortunadamente, presenta los valores de productividad más bajos. La escasa densidad está incidiendo sobre este factor; se reforestó a 3.5 x 4.0 m, 4.5 x 4.5 m y 6.0 x 6.0 m de distancia, pero no sobrevivieron muchos individuos. Según Oviedo (1980) la supervivencia en las áreas reforestadas de *Pinus halepensis* fluctuó entre 38 y 84% (183 a 559 árboles/ha), actualmente la densidad del arbolado es menor debido al ambiente poco favorable y a la repercusión de las actividades antropogénicas que predominan en los sitios. La escasa humedad en el sustrato, su condición calcárea, la poca acumulación de materia orgánica y de precipitación; así como las extremas temperaturas durante todo el año resultaron en bajos niveles de productividad con respecto a la del estado de Nuevo León (Figura 5).

El nivel de productividad de *P. halepensis* es entre alto y medio en las áreas A-11, A-14 y A-15, los suelos son calcáreos, no muy profundos y con poca materia orgánica. El arbolado en pie es de baja altura, pues su crecimiento se inhibe por la falta de humedad edáfica (Figura 5).

Las áreas A-1, A-2, A-8, A-13, A-16 se caracterizan por ser lugares degradados, pedregosos y secos, lo que ha contribuido a la eliminación de arbolado en pie, efecto del consecuente estrés hídrico, o por plagas o enfermedades; por lo tanto, los niveles de productividad son de bajos a muy bajos.

Productividad en plantaciones del estado de Durango

En el estado de Durango, *P. cooperi* manifestó la máxima variación en los niveles de productividad. En la parte alta de la Sierra Madre Occidental (Alto de Latas, La Victoria, La Escondida, La Ciudad y Los Bancos) es la especie dominante, crece en lugares con exposición zenital, en suelos profundos, ricos en materia orgánica y en altitudes superiores a los 2600 m se genera la mayor productividad. En localidades caracterizadas por algún disturbio, su calidad productiva es intermedia. En sitios con altitudes inferiores a dicha cota, bajo condiciones locales pobres y cerca de áreas pobladas se desarrollan especies poco productivas (Agua Blanca, Miravalles y la Flor). Es decir, *P. cooperi* plantado en pastizales y posiblemente en condiciones de sobrepastoreo y ramoneo por animales domésticos presenta las cifras más bajas (Figura 3).

Pinus durangensis tiene una alta variación aunque menor que *P. cooperi*. Alcanza niveles significativos de productividad en mesetas ubicadas en altitudes por arriba de los 2600 m, con suelos profundos y ricos en materia orgánica. Por el contrario, sobre suelos someros, pobres en materia orgánica y con algún disturbio antropogénico o ambiental, la respuesta productiva es baja o regular (Figura 3).

CONCLUSIONES

Las diferentes características de las especies plantadas, así como de las fisiográficas, edáficas y biológicas prevalecientes en cada uno de los lugares en donde se localizan las plantaciones evaluadas en el norte de México, permitieron definir un modelo de estimación de curvas de productividad para cada una de las regiones estudiadas.

Las plantaciones de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango tienen mayores índices de productividad, debido a la presencia de especies nativas y condiciones favorables para su establecimiento.

En la Sierra Madre Oriental, las reforestaciones fueron de baja productividad porque en su mayoría se observaron especies exóticas y la calidad de sitio es menor. Las condiciones climáticas con mejor balance hidrológico están reunidas en Nuevo León y, por consiguiente, los sitios reforestados presentaron niveles de productividad más altos a los registrados en Coahuila.

A pesar de utilizar especies nativas en el caso de Durango, la productividad fue muy variable, lo que puede estar asociado a las condiciones de los sitios reforestados dados por el clima, la topografía, la pendiente, la exposición, entre otros factores.

Los resultados aplicables de esta investigación reflejan la necesidad de ajustar individualmente el desarrollo de modelos para las plantaciones de cada región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores hacen patente su agradecimiento al fondo de investigación que otorgó el financiamiento para el proyecto de investigación CONAFOR-CONACYT COCO1 No. 6230.

REFERENCIAS

- Brown, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. *In: Actas del XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Árboles.* Vol. 1. 13-22 de octubre de 1997. Anatolya, Turquía. pp. 107-108.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2004. Evaluaciones PRONARE 2000-2001. <http://www.conafor.gob.mx/programas/nacionales/forestales/evaluaciones/indexhtml>. (25 de Julio de 2004).
- Domínguez C., P. A. und J. Návár. 2000. Einfluss der flanzqualität von *Pinus pseudoestrobis* Lindl. auf urlbensrate und uchsleitung bei aufforstungen in der ostlinchen Sierra Madre Mexikos. *Forstarchiv*, 71. Heft 1: 9-13.
- González B., N. 2001. Ajuste y validación de modelos para estimar biomasa y rendimiento e incremento en biomasa en plantaciones forestales del estado de Durango. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Linares, N. L. pp. 38-50.
- Mesera O., M. 1996. Servicios ambientales de las plantaciones comerciales: la captura de carbono. *Bosques y Plantaciones Forestales. Cuadernos Agrarios* 14 nueva época. México, D. F. pp. 79-81.
- Návár J., N., D. González M., J. Graciano, V. Dale and B. Parresol. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 10(2): 17-28.
- Návár J., C. Estrada, J. Contreras, P. A. Domínguez and M. Using. 2001. Evaluation of the abundance, form of establishment, and the causes of variation of pine regeneration in coniferous stands of the western Sierra of Durango, Mexico. *Forstarchiv*, Heft 72: 175-179.

- Oviedo R., J. 1980. Inventario de las alternativas de transformación de especies forestales de la Sierra de Zapalinamé en Saltillo, Coahuila. Tesis de Ingeniero Agrónomo Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, pp. 4-58.
- Woerner, M. 1990. Los suelos del Bosque-Escuela de la UANL en al Sierra Madre Oriental, Iturbide, N L. Reporte Científico No. 20 Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N. L. 90 p.

NOTA TÉCNICA

OBSERVACIONES FENOLÓGICAS DE *Satureja macrostema* (Benth.) Briq., EN DOS LOCALIDADES DE MICHOACÁN, MÉXICO

Mario Aguilar Ramírez¹, Hipólito Jesús Muñoz Flores¹,
Miguel Hernández López¹, Miguel Ángel Bello González¹
y Rafael Salgado Garciglia²

RESUMEN

Las especies del bosque secundario representan un gran potencial como generadoras de alternativas para el desarrollo social. El té nurite (*Satureja macrostema*) en la medicina tradicional del pueblo Purépecha se utiliza para combatir infecciones intestinales, así como estomático y estimulante de los movimientos gástricos. El presente estudio se realizó en un módulo de domesticación establecido en el Jardín del Campo Experimental Uruapan del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, en tres sitios de investigación localizados en terrenos de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, y una plantación de *Pinus pseudostrobus*-*Alnus acuminata* ssp. *arguta*. Se determinó que cada evento fenológico se relaciona con los patrones estacionales, el ciclo anual climatológico y en ocasiones un solo factor ambiental es el responsable de la presencia o ausencia de alguna fase. La temperatura y la humedad influyen en la expresión final de cada etapa fenológica así, la vegetativa o foliación se observa durante el verano, se inicia con las lluvias y termina a finales del otoño. La floración comienza en invierno y se prolonga hasta la primavera; mientras que la fructificación se manifiesta de enero a mayo (invierno hasta primavera), en tanto que la defoliación coincide con la floración y la fructificación en relación directa. La presencia de hojas más grandes al promedio citado para la especie y el mayor número de flores por verticilo sugieren la existencia para el área de otra especie, variedad o forma.

Palabras clave: Fenología, México, Michoacán, plantas medicinales, *Satureja macrostema*, té nurite.

Fecha de recepción: 26 de agosto de 2004.
Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2005.

¹ Campo Experimental Uruapan, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, INIFAP. Correo-e: muñoz.jesus@inifap.gob.mx

² Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

ABSTRACT

Secondary forest species offer great potential as sustainable non-timber forest products for socio-economic development. The P'urhêpecha people use te nurite (*Satureja macrostema*) as a traditional medicine to treat stomach and intestinal infections, and stimulate gastric movements. The purpose of the present study was to determine the phenology of *Satureja macrostema* in relation to the major ecological factors. The study was carried out in a domesticated stand of the botanic garden of the Uruapan Experimental Station (INIFAP) a natural stand in the forest of the Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacan, Mexico, and in a *Pinus pseudostrobus*-*Alnus acuminata* ssp. *arguta* plantation. Each phenologic event is related to seasonal patterns and cycles; but one environmental element can be identified as the most important factor for the presence of any phenologic phase. Temperature and humidity are the major abiotic factors that influence their final expression. The foliar phase occurs during summer, starting in the rainy season and ending in the fall. Flower production begins during winter and lasts until spring. Fruit production occurs from January to May (winter-spring). Defoliation is inversely correlated with flower and fruit production since, as they increase, so does leaf fall. Larger leaf size and more numerous flowers per flowering branch, suggests the species in this region may be distinct from other species.

Key words: Phenology, Mexico, Michoacan, medicinal plants, *Satureja macrostema*, te nurite.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las etapas de crecimiento y desarrollo de *Satureja macrostema* (Benth.) Briq. es esencial para su manejo sustentable y dado que no existen registros sobre investigaciones fenológicas del té nurite, la presente investigación se llevó a cabo con la finalidad de obtener tal conocimiento.

Desde sus orígenes, el hombre ha utilizado a las plantas como parte de su dieta, primero como recolectores de follaje, raíces, frutos y semillas; después (aproximadamente 10,000 años) como cultivadores de distintas especies, logrando una fuente de alimento más abundante y confiable. Ligado a la historia de la humanidad en la agricultura, ha estado el arte de observar la secuencia temporal de las distintas fases del ciclo de vida de los vegetales a lo largo del año, lo que se conoce como fenología, del griego phaino, mostrar o aparecer (Linnaeus, 1751; Schenell, 1955, citado por Montenegro y Ginocchio, 1998).

El propósito de los estudios más antiguos fue construir calendarios fenológicos, los que se superponían con el astronómico. De tal manera que, las estaciones

del año estaban marcadas por grupos fechados de eventos propios del desarrollo de sus cultivos (Lieth, 1974). En otras palabras se utilizaba la fenología como una técnica del área de la meteorología agrícola. De esta forma, el hombre aprendió en qué fechas sembrar y cosechar para obtener los mejores rendimientos de las plantas usadas como alimento.

La fenología se define como el estudio de la secuencia temporal de sucesos biológicos recurrentes (predecibles), en un intento por interpretar las causas bióticas y abióticas de tales secuencias; así como la interacción entre las fases de la misma y/o de distintas especies (Lieth, 1974; De Fine y Revelo citado por Hinojosa, 1979); su conocimiento permite implementar el uso óptimo de insumos y el aprovechamiento de los factores genéticos y ambientales (Solórzano, 1980).

Las distintas etapas del ciclo de vida de una planta se pueden agrupar en fenofases arbitrarias, tales como la germinación; crecimiento vegetativo del adulto, de una plántula; floración, fructificación y dispersión (Flint, 1974).

El ambiente es la suma de las influencias o fuerzas externas que actúan sobre los organismos modificando su crecimiento, estructura y reproducción en un lugar determinado (Billing, 1968). La fenología estudia los cambios a través del tiempo de la vida vegetal; se basa exclusivamente en establecer de la siembra a la cosecha, la fecha de las diferentes fases del desarrollo, a fin de precisar la división del periodo vegetativo en subperiodos y determinar los que son críticos (Azzi, 1971).

Font Quer (1979) indica que el término fenología es la forma contracta de fenomenología, según el diccionario Webster es el estudio de los fenómenos biológicos acomodados con cierta regularidad como: la brotación, la floración, la maduración de los frutos, etc.; éstos se relacionan con las condiciones meteorológicas en que ocurren, y viceversa; de la fenología se pueden obtener secuencias relativas al clima, sobre todo del microclima, cuando ninguno de los dos se conocen completamente.

Los términos fenología, crecimiento y desarrollo son confundidos en la predicción de etapas del ciclo de vida de las plantas, de hecho los dos últimos definen al primero como el estudio de los eventos secuenciales involucrados en el desarrollo total del cultivo; el crecimiento es más usado para referirse al incremento en tamaño, mientras que el desarrollo se refiere a la diferenciación de células al producir nuevos órganos (Anderson *et al.*, 1978).

Por otra parte, para Solórzano (1980) la fenología permite comprender las respuestas de los seres vivos al ambiente, vía la variación de éstas a lo largo de su crecimiento, examina las transformaciones de los organismos en el tiempo y su interacción con el ambiente. Conocer cuáles son las etapas críticas de las plantas cultivadas y su uso adecuado en determinadas condiciones ambientales,

favorece los incrementos en la producción; así como ahorros en los insumos disponibles, con lo que aumentan los beneficios económicos.

Azzi (1971) menciona que para sintetizar el estudio de la fenología, es conveniente medir el periodo de vida de una especie en varios estadios y así facilitar la comprensión del comportamiento de los seres vivos a través de su desarrollo.

Los factores antes señalados están muy relacionados con los principios activos que contienen los órganos vegetales, ya que en la planta se presentan procesos de translocación y acumulación, que no sólo pueden tener un ritmo anual o estacional, sino inclusive diario.

En este contexto, la determinación de las fases fenológicas de las plantas medicinales bajo condiciones de cultivo, adquiere gran importancia, ya que la concentración de sus principios biológicos activos está influenciada por fenómenos atmosféricos, tales como: la temperatura, la precipitación y la luz (Fuentes y Granda, 1984). Su cultivo tiene por objetivo obtener la mayor cantidad de principios activos, cuyo campo es altamente especializado y requiere de estudios avanzados y numerosas investigaciones (Mahram, citado por Estrada, *et al.*, 1996).

Cada estadio distintivo dentro del ciclo de vida de una especie se denomina fenofase. En los trabajos fenológicos las observaciones se realizan al principio y final de cada etapa, en especial cuando los organismos muestran cambios en un periodo muy corto de tiempo. La forma en que ocurre la fenofase a lo largo del año se llama "fenodinámica", al contabilizar el porcentaje de taxa que en una comunidad inician una fenofase dada, permite definir los "fenogramas". La elaboración de la fenodinámica para cada taxón en una comunidad, o su presentación en cuadros comparativos se conoce como "espectro fenológico" (representación gráfica) (Bello, 1983).

Durante el verano de 1996, se establecieron un módulo de domesticación de té nurite (*Satureja macrostema*) en el Jardín Botánico del Campo Experimental Uruapan (CE-Uruapan); además de tres sitios de investigación en diferentes parajes (uno por localidad), ubicados en terrenos de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), con las siguientes características:

Sitio experimental 1. "Agua Chiquita", superficie de 1 ha, con bosque mixto regular de *Pinus-Quercus*, y corta de 20% de arbolado.

Sitio experimental 2. "Cerro Prieto", 1 ha de bosque irregular de *Abies-Pinus* con corta de 33% de arbolado.

Sitio experimental 3. "Cerro de la Laguna", 1 ha de bosque irregular de *Pinus-Abies* de 30% de corta del arbolado.

El criterio de selección consistió en que fueran manchones de grandes dimensiones, para establecer los sitios experimentales sin restricción de área y con el mínimo de disturbio.

En cada localidad se procedió a la delimitación de 1 ha (100 x 100 m) con alambre de púas para evitar daños por el pastoreo y se hizo una guardarraya de 2 m de ancho para protección contra incendios forestales. En la superficie cercada se limitaron cinco sitios de 10 x 10 m para realizar las mediciones y observaciones a partir de 1996 al 2000. (Figura 1).

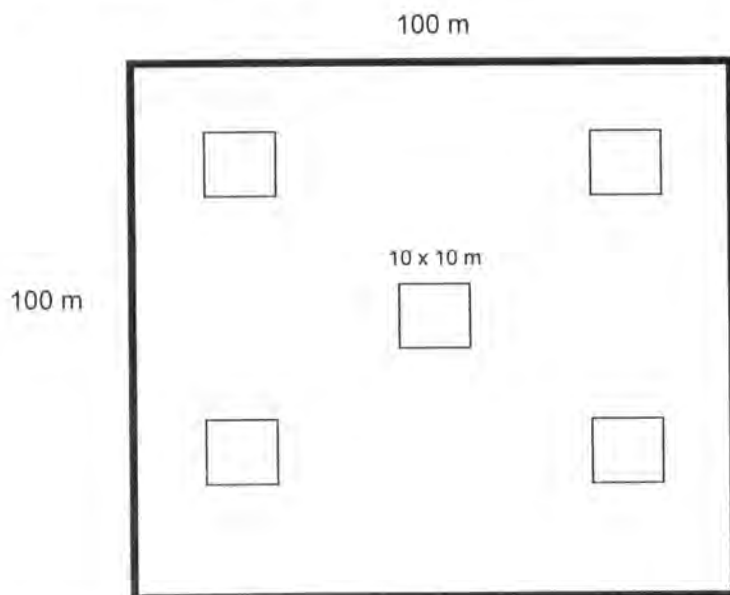


Figura 1. Forma y tamaño de los sitios permanentes para el estudio de *Satureja macrostema* en la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Mich.

Además se estableció un módulo de observación y muestreo en una plantación de *Pinus pseudostrobus* Lindl.-*Alnus acuminata* spp. *arguta* (Schlechtld.) Furlow., localizada en terrenos de la misma comunidad.

Observaciones fenológicas

En los sitios de 10 x 10 m se ubicaron y contabilizaron individuos de la especie de interés por m², a continuación se les colocó un listón de diferente color en

cuatro ramillas localizadas en cada uno de los puntos cardinales, a las cuales se les dio seguimiento con relación a su fenología.

La caracterización de las fases se hizo con base en la clasificación del Instituto de Genética Forestal de Placerville, California (Cumming y Rigter, 1948), que comprende los siguientes aspectos:

Fase vegetativa.- Incluye desde la presencia de una yema vegetativa hasta el desarrollo total de las hojas. La aparición de un vástago rudimentario en las axilas de las hojas, protegido por una serie de catáfilos es conocida como yema vegetativa (YEM VEG). Esta fase se considera activa a partir de la emisión de los primordios vegetativos (V1). Al momento de alcanzar la mitad de longitud del desarrollo normal de la hoja, se le denomina plenitud de la fase (V2); cuando se llega al tamaño máximo se registra como fin del estadio (V3).

Floración.- Se designa yema floral (YEM FL) a la etapa en la que las estructuras florales están encerradas en catáfilos; a la presencia de pétalos y sépalos con el desarrollo parcial y total de los estambres se clasifica como inicio de la floración (F11). La liberación de los granos de polen constituye la plenitud de la fase (F12), al final de ella se observa la marchitez de las estructuras florales, lo que implica su conclusión (F13).

Fructificación.- El inicio se denomina Fr1, el desarrollo completo de la semilla dentro del ovario corresponde a Fr2, la madurez del fruto con la dispersión de la semilla es la etapa Fr3.

La nominación total de una fase fenológica en la población estudiada, se determinó cuando 60% de las plantas muestreadas presentaron el mismo estadio.

Ciclo anual de desarrollo

Actividad vegetativa.- En el presente trabajo se observó que 30% de las plantas de *Satureja macrostema* pierden 100% de sus hojas; en tanto que 70% sólo tiran entre 80 y 90%. Este comportamiento da origen a suponer la presencia en el área de estudio de otra especie, variedad o forma del té nurite; también se nota que el tamaño de las hojas es variable (Figura 2); algunas tienen de 4-5 cm de largo, el cual es mayor al rango (1-4 cm) descrito en las monografías y claves del taxón, pero en promedio son de 2.5 a 3.5 cm de longitud, contrastando a simple vista ambos tipos de plantas, lo que refuerza la idea anterior.

Un ejemplo de arbusto con dimorfismo foliar estacional es la especie nativa del matorral de la zona mediterránea de Chile, *Satureja gilliesii* (Benth.) Briq., que muestra hojas grandes en dolicoblastos durante el invierno, y hojas pequeñas en braquiblastos en la primavera. La primera respuesta a la sequía estival es la caída de las hojas de los dolicoblastos, y la segunda es la completa deshidratación

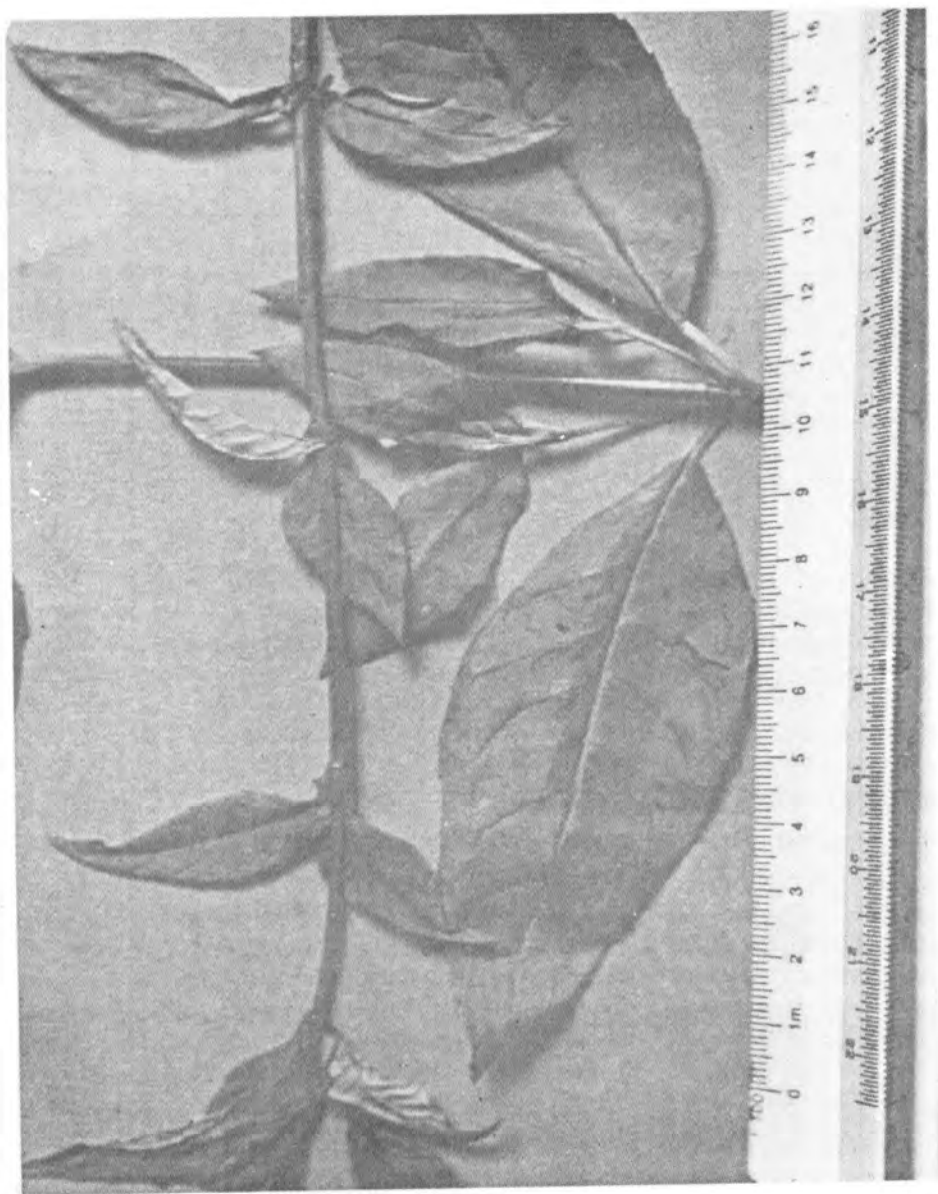


Figura 2. Diferentes tamaños de hojas del té nurite (*Satureja macrostema*).

de las que se localizan en los braquiblastos, sin ser eliminadas del dosel, éstas reverdecen con las lluvias de la estación. Lo anterior es un ejemplo de poiquilohidrisismo a nivel de Angiospermas, poco descrito en la literatura (Montenegro *et al.*, 1979), pero que fue observado en algunas plantas de té nurite (Figura 3), lo que sugiere un comportamiento extraordinario de adaptabilidad de algunos individuos a cambios ambientales, por lo que pudiera tratarse de una especie o variedad no registrada para la zona de estudio.

El crecimiento vegetativo se produce, en la mayoría de los casos, cuando las condiciones del ambiente son las más favorables para mantener un balance hídrico adecuado; además de que la temperatura promedio sea óptima para desencadenar la producción hormonal. La caída de las hojas y de las ramas, también se relacionan con la disminución de las estructuras fotosintetizadoras y tiene lugar durante los periodos en los que algún factor limita el crecimiento, lo que mantiene a la planta bajo estrés (Orshan, 1954). La senescencia y pérdida de los órganos ayuda a disminuir, en parte, el efecto que produce la falta de recursos en un momento dado, ya que disminuye el costo energético que significa mantener estructuras de las que la planta puede prescindir (Montenegro *et al.*, 1998).

Periodicidad en la caída de las hojas.- En las plantas de *Satureja macrostema* se observó una tendencia a la defoliación que inicia en los meses de noviembre-diciembre (Figura 4), justo al terminar la foliación o fase vegetativa e inmediatamente después de la aparición de las primeras yemas florales, es decir, al iniciar la floración se incrementa la senescencia de las hojas, que coincide con el fin de las lluvias e inicio del invierno; la pérdida de las hojas aumenta de manera importante durante el periodo más seco (marzo-abril-mayo) y se interrumpe con las primeras precipitaciones al terminar la fructificación.

Cabe señalar que la caída de las hojas se presentó todo el año, pero ésta fue mínima y se caracterizó por ser más notable en la época antes señalada, la defoliación fuera de temporada responde a la existencia de hojas adultas de un ciclo anterior, o bien a la falta de luz, que ocasiona un cambio de coloración de amarillento a blanquecino, seguido por su muerte y caída.

Un comportamiento diferente muestran las plantas del módulo del Jardín Botánico del CE-Uruapan y la CINSJP, en las cuales su follaje permaneció verde todo el año; sin embargo, en el módulo del Jardín Botánico se realizaron riegos esporádicos que pudieron ayudar a conservar la humedad en el suelo, aunque es importante hacer notar que el manto freático tanto en Uruapan, como en la CINSJP, se localiza entre 1-3 m de profundidad y las raíces del té nurite son profundas, lo que explicaría que este factor no sea una limitante para que las hojas de las plantas persistan y se incrementen.



Figura 3. Poikilohidricismo en té nurite (*Satureja macrostema*).

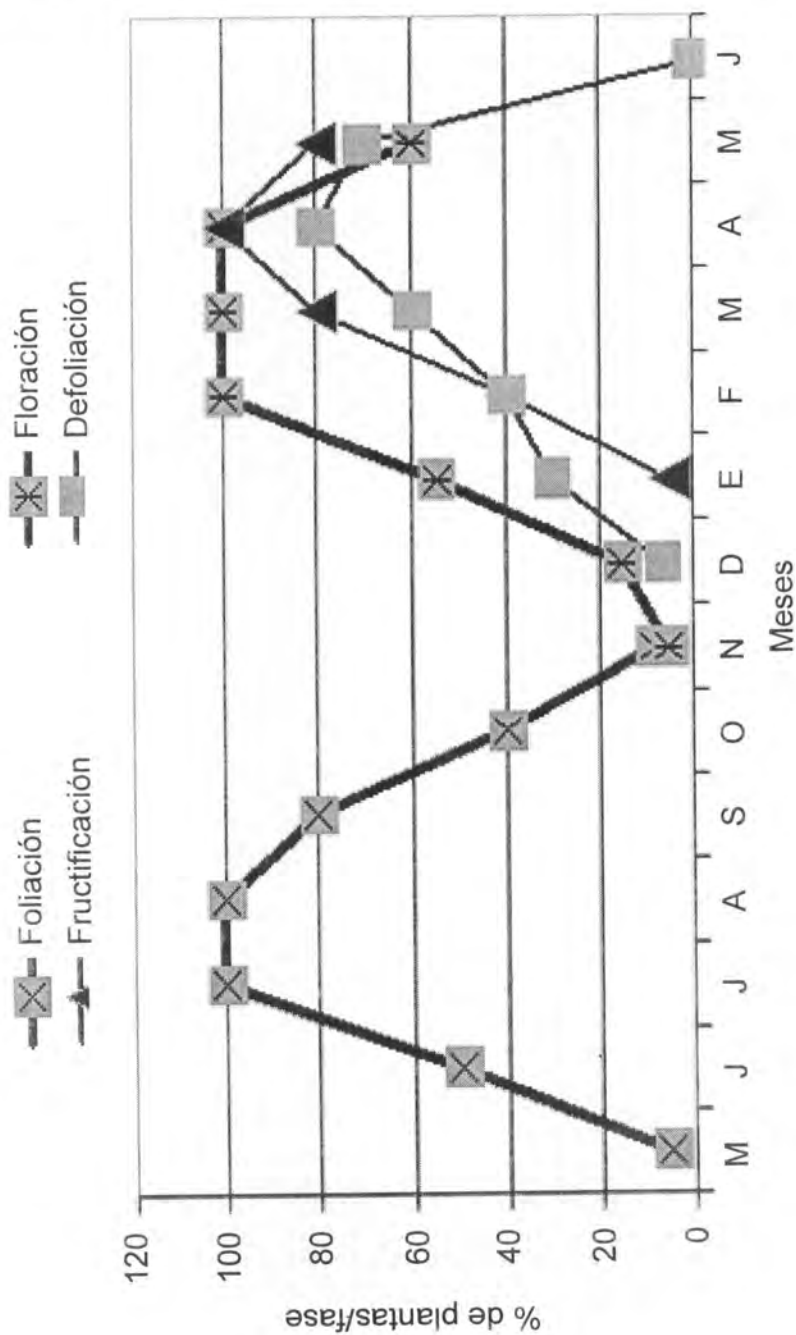


Figura 4. Fenología del té nurite (*Satureja macrostema*)

Lo anterior resulta de mayor importancia para el cultivo de la especie, ya que se tendría follaje verde todo el año para su cosecha, hecho que no sucede con las plantas silvestres que presentan defoliación. La respuesta de los individuos establecidos en las plantaciones de *Pinus pseudostrobus* - *Alnus acuminata* ssp. *arguta*, fue similar al de los individuos silvestres.

El costo en términos del carbono para mantener las hojas durante el periodo desfavorable en las especies decíduas, sobrepasa el precio de volver a desarrollarlas (Mooney y Miller, 1985). La cantidad de carbono fijada por los vegetales está determinada por la disponibilidad de recursos en el ambiente, los eventos fenológicos tales como: inicio y elongación del tallo y de las hojas, floración, fructificación y abscisión o muerte de las hojas, son procesos ligados a las estrategias propias de cada especie para la asignación de carbono (Mooney *et al.*, 1977). El ciclo de vida de las plantas de clima mediterráneo depende en gran parte del potencial hídrico del suelo, dado que éste varía con la profundidad a lo largo de las estaciones, y que las diferentes formas de vida tienen sistemas radicales con distinta profundidad, sus ciclos son asincrónicos; así mismo, la condición de la etapa de crecimiento también ésta desplazada (Mooney y Miller, 1985).

Inicio del estado vegetativo.- La periodicidad de la categoría (V1) o emisión de primordios vegetativos, es justo al final de la fructificación (mayo) e inicio de la temporada de lluvias (mayo-junio), con altas temperaturas (máxima de 24°C); éstos son los factores que disparan el proceso de aparición de las "hojas primarias", comportamiento que a la fecha no había sido registrado, que se caracteriza por la presencia de hojas de mayor tamaño al citado en las claves taxonómicas, las medidas del material estudiado fueron de 10.5 cm de largo y 3.5 cm de ancho (Figura 2), para el caso de los individuos en fase V2 (julio-agosto) (figuras 4 y 5). El follaje disminuye hasta terminar los meses de octubre-noviembre (V3), cuando principia la defoliación de las primeras ramillas del ciclo anterior, la aparición de las primeras y aún escasas yemas florales.

Un recurso de vital importancia para el crecimiento vegetal es el agua, su disponibilidad influirá en el inicio y en la intensidad de los eventos fenológicos; aunque, es importante señalar que las especies difieren en sus respuestas al estrés hídrico (Poole y Miller, 1975; Orshan *et al.*, 1988).

Floración.- La fase de floración está muy relacionada con la caída de las hojas, al acrecentarse el número de flores, la abscisión de las hojas aumenta e inicia la fase F11, justo al terminar el estado vegetativo (octubre-noviembre), cuando aparecen las primeras yemas florales (figuras 4, 5 y 6). Cabe hacer notar que en la etapa vegetativa se desarrollan hojas y ramillas, son estas últimas las que inician un verdadero crecimiento vegetativo asociado a la floración, ya que cada nueva

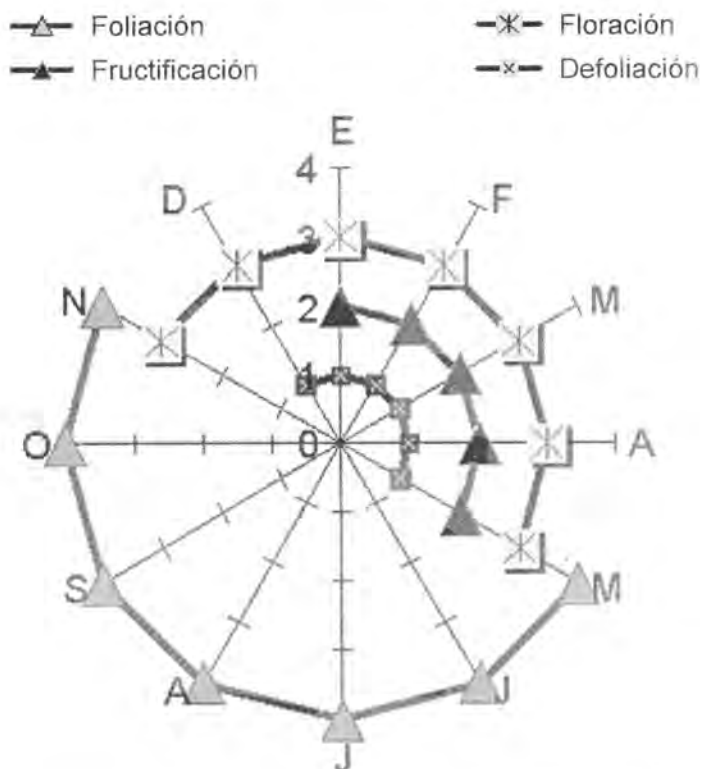


Figura 5. Fases fenológicas del té nurite (*Satureja macrostema*)

ramilla produce en los entrenudos a las yemas florales, de tal manera que entre más crecen e incrementan su número, mayor cantidad de flores aparecerán hasta llegar a su plenitud (FI2) en los meses secos de febrero y marzo (Figura 7), época en la que se observa la liberación de polen, lo que marca el inicio de la fase vegetativa, con las primeras lluvias.

La mayoría de las estructuras reproductivas en las especies deciduas de verano se desarrollan a partir de yemas terminales y axilares de los braquiblastos absolutos, probablemente debido a que los recursos invertidos en producir entrenudos son bajos, la planta puede canalizar gran parte de ellos hacia la formación de órganos sexuales, como en el caso del té nurite. Estos taxa al final del período de crecimiento no sólo eliminan gran parte de las hojas, sino que también pierden las ramas cortas (Montenegro *et al.*, 1998) con lo que disminuyen,

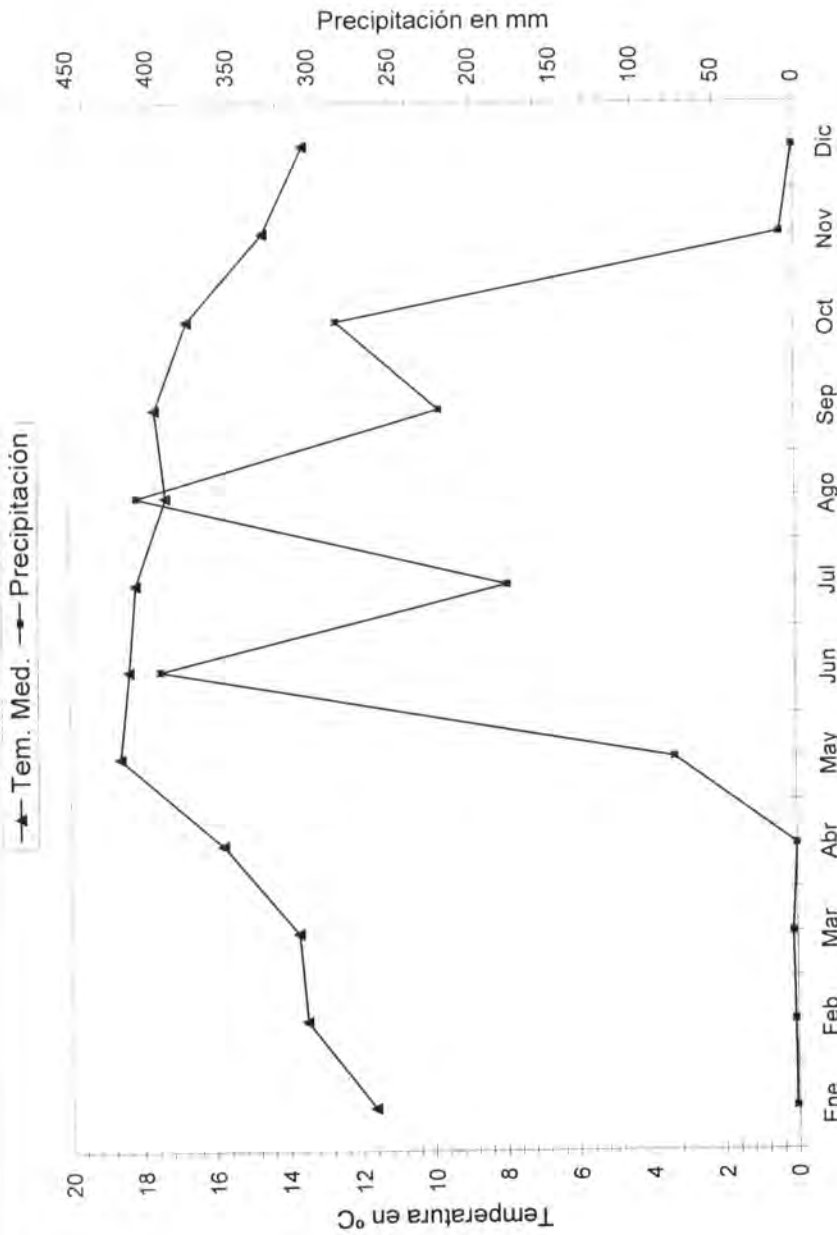


Figura 7. Climatología ombrotérmica. Estación Meteorológica Uruapan.

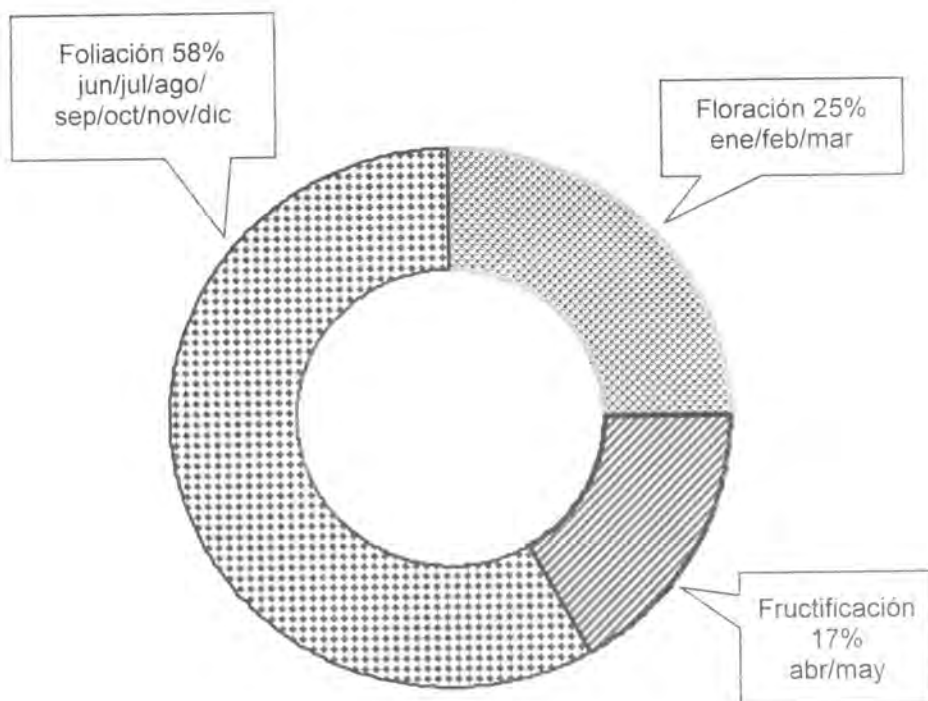


Figura 6. Fenología anual del té nurite (*Satureja macrostema*).

de manera significativa, las estructuras no utilizadas (Solbring y Orians, 1977; Lovell, 1985).

En los sitios experimentales, la floración tuvo lugar en las estaciones de invierno y primavera (figuras 4, 5 y 6), el total de las plantas la presentó en los meses de febrero, marzo y abril, lo cual coincide con las observaciones efectuadas por varios investigadores en otras especies (Aubreville, 1938; Hiltum, 1953; Njoku, 1963; citados por Bello, 1983); el hecho de lograr la plenitud floral en el período de febrero-marzo, relaciona tal efecto con la temperatura ya que en este lapso de tiempo, por lo regular se registra un incremento de 12 a 15°C (Figura 7) que afecta su inicio y desarrollo (Kramer y Kozlowski, 1960).

Por otro lado, el comportamiento de la floración en los módulos y la plantación, fue idéntico al de las plantas silvestres de los sitios experimentales de la CINSJP, en cuanto al inicio y término de las fases descritas; sin embargo, hubo diferencia en el número de flores (Figura 8) y ramillas que las presentaron en el módulo del

Jardín Botánico del CE-Uruapan, sólo se manifestó en 20% de las plantas y de ellas unas cuantas ramillas tenían de 1 a 2 flores, lo anterior sugiere que la disponibilidad de recursos determinó ese comportamiento, en este caso la humedad en el suelo; ya que las plantas no detectaron, no necesitaron, o bien la abundancia del recurso interrumpió la secuencia de la floración, y como respuesta se obtuvo un abundante follaje sin permitir en grado importante el desarrollo de flores, y mucho menos la abscisión o senescencia de las hojas, por lo que la presencia de humedad es uno de los factores externos que ejercen mayor influencia en la presencia o ausencia de las fases fenológicas (Kramer y Kozłowski, 1960).

Una observación relevante es que algunos individuos mostraron dos ramilletes florales por axila, de los que se forman de seis a siete flores, que indican la existencia de variación que pudiese dar origen a variedades o formas, pues dicho comportamiento se sale del contexto citado para esta especie, cuyo número de flores registrado por otros autores es de 1 a 4.

Periodicidad de la fructificación

Esta fase tuvo un desarrollo gradual durante la época de secas, cuando es nula o menor la precipitación, abarca el ciclo de invierno y primavera (enero-mayo), se caracteriza por el crecimiento de las nuevas ramillas que generan yemas florales, las que a su vez maduran paulatinamente, de tal manera que los primeros frutos (Fr1), aparecen en el mes de enero, hasta alcanzar su punto máximo entre marzo y abril (Fr2), al tiempo en que la dispersión de semillas se incrementa; la fase Fr3 ocurrió al momento en que la dispersión de semillas declinó en el mes de mayo (figuras 4, 5, 6 y 9).



Figura 8. Floración de *Satureja macrostema* en el módulo de Uruapan y en los sitios experimentales de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Mich.

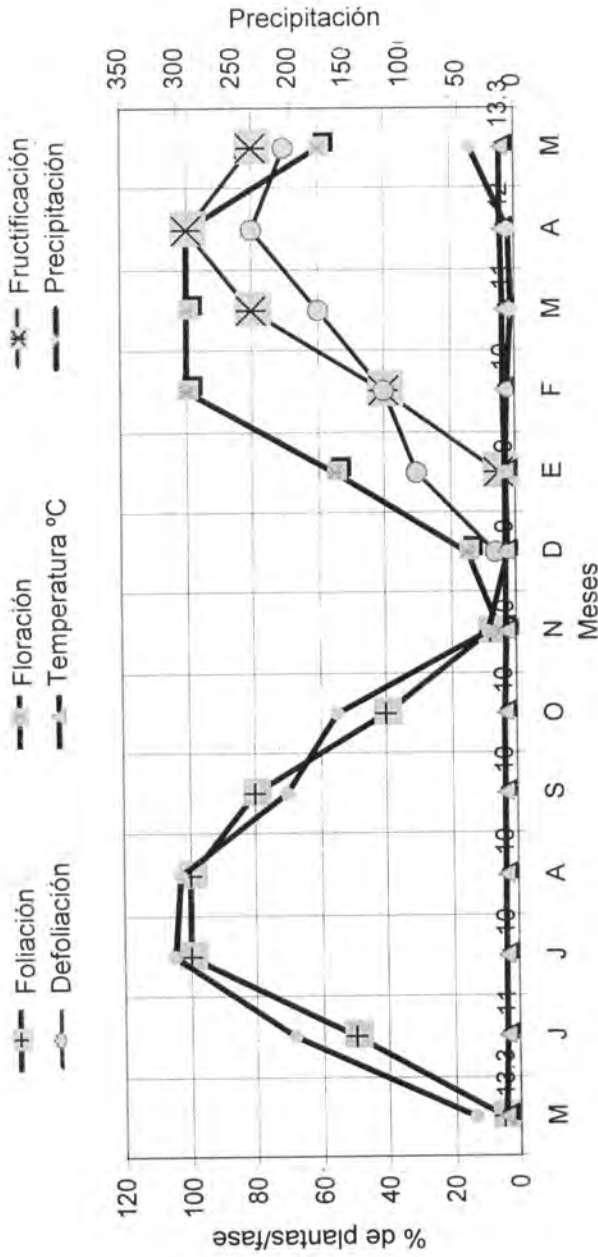


Figura 9. Fenología del té nurite (*Satureja macrostema*) y su relación con la temperatura y la precipitación.

REFERENCIAS

- Anderson W. L., R. Smith and Mc William, J. 1978. A systems approach to the adaptation of sunflower to new environments. *In: Phenology and development. Field Crops Research* 7:141-152.
- Azzi, G. 1971. *Ecología Agraria*. Instituto Cubano del Libro. La Habana, Cuba. 424 p.
- Bello G.; M. 1983. Estudio fenológico de cinco especies de *Pinus* en la región de Uruapan, Mich. (México). Tesis profesional. Facultad de Ciencias. UNAM. México, D. F. 67 p.
- Billings, G. 1968. Las plantas y el ecosistema. Serie Fundamentos de la Botánica. Ed. Herrero, S. A. México. 168 p.
- Cumming, W. C. and F. I. Richter. 1948. Methods used to control pollination of pines in the Sierra Nevada of California. USDA. Circ. 192, 18 p.
- Estrada, L., A. Marín, R. Quintana y A. Paz. 1996. Germinación y fenología: revisión bibliográfica. *Plantas Medicinales de México. Introducción a su estudio*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. pp. 397-410.
- Flint, H. L. 1974. Phenology and genealogy of woody plants. *In: H. Lieth (Ed.). Phenology and seasonality modeling*. Springer Verlag New York, pp: 83-100.
- Fuentes, E. y Granda M., M. 1984. Aspectos fenológicos del género *Datura*. *Revista Cubana de Farmacia* 18(2):46-55.
- Hinojosa, C. 1979. Fenología. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. Boletín Técnico No. 3. 61. p.
- Kramer, P. J. and T. T. Kozlowski. 1960. *Physiology of trees*. Mc. Graw-Hill, New York, pp. 114-162
- Lieth, H. 1974. Purposes of a phenology book. *In: H. Lieth (Ed). Phenology and seasonality modeling*. Springer Verlag. New York. pp. 3-19.
- Lovell, P. 1985. The importance of plant form as a determining factor in competition and habitat exploitation. *In: I. White. (Ed.). Studies on plant demography*. Academic Press. London. pp. 209-219.
- Montenegro, C., Hoffmann, A. J., Aljaro, E. M. and Hoffmann, A. E. 1979. *Satureja gilliesii*, a poikilohydric shrub from the Chilean Mediterranean vegetation. *Can J. Bot.* 57 (11):1206- 1231.
- Montenegro, C. y Ginocchio, R. 1998. Arquitectura metamérica en especies arbustivas de ecosistemas mediterráneos. *In: Proceedings of the 6th Latin American Botanical Meeting. Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 68: 363-380.
- Mooney, H., Kummerow, J., Johnson, D., Keeley, A., Hoffmann, A., Hays R., Gilberto, J. and C. Chu. 1977. The producers. Their responses and adaptative responses. *In: (Ed.). K. Mooney, Convergent evolution in Chile and California: Mediterranean Climate Ecosystems*. Dowden, Hutchinson and Ross. Stroudsburg, Penn. pp. 255-267.

- Mooney, H. and Miller, C. 1985. Chaparral. *In*: B. Chabot and H. Mooney (Ed.). Physiological ecology of north american plant communities. Chapman and Hall. New York. pp. 213-231.
- Orshan, G. 1954. Surface reduction and its significance as a hydroecological factor. *J. Ecol.* 42:442-444.
- Orshan, F., E. Floch, A. Le Roux and G. Montenegro. 1988. Plant phenomorphology as related to summer drought in mediterranean type ecosystems. *In*: Di Castri, F., Ch. Floret, S. Rambal and J. Roy (Eds.). Time scales and water stress. Proceedings of the 5th. International Conference on Mediterranean Climate Ecosystems. IUBS, Paris. pp. 111-123.
- Poole, D. and C. Miller, 1975. Water relations of selected species of chaparral and coastal sage communities. *Ecology* 56: 1118-1128.
- Solbrig, O. and G. Orians, 1977. The adaptative characteristics of desert plants. *Amer. Sci.* 65: 412-421.
- Solórzano V., E. 1980. Fenología y comportamiento de los componentes del rendimiento bajo condiciones ambientales contrastantes de 10 genotipos de haba (*Vicia faba* L). Tesis de M. en C. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. 147 p.