

Artículo original

Dosis y frecuencia de fertilizante mineral para el establecimiento de plantaciones de pinares en suelos ácidos

Jorge Luís Reyes-Pozo^{1*} 

Grisel Herrero-Echeverría² 

María Amparo León-Sánchez³ 

¹Instituto de Investigaciones del Tabaco (IIT), UCTB Estación Experimental del Tabaco, Finca Vivero. Km 62½ Carretera Panamericana. San Juan y Martínez, Pinar del Río, Cuba

²Instituto de Investigaciones Agro-Forestales (INAF). Calle 174 no. 1723 el 17B y 17C, Reparto Siboney, Playa, La Habana, Cuba

³Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Avenida José Martí No. 270, Pinar del Río, Cuba, CP 20100

*Autor para correspondencia: investigacion4@eetsj.co.cu

RESUMEN

En Cuba existen pocos estudios encaminados a recomendar dosis y frecuencia de fertilizante mineral NPK para el establecimiento de plantaciones forestales, estas se usan de forma incorrecta sin tener en cuenta las consecuencias negativas que puede acarrear su aplicación tanto en exceso como en defecto. Por ello, la presente investigación estudió la respuesta de diferentes dosis y frecuencia de la fertilización mineral aplicada de forma fraccionada durante los primeros cinco años de establecida una plantación de *Pinus caribaea*. La investigación se realizó en la Estación Experimental Agroforestal de Viñales, Pinar del Río, Cuba. Se investigó diferentes dosis y frecuencias de NPK, a partir de un diseño de bloques al azar. Se establecieron siete tratamientos diferenciados por las dosis de NPK y regímenes de aplicación, más un tratamiento testigo sin fertilización. Se hicieron mediciones de altura y diámetro en diferentes edades con las cuales se determinó el volumen y se le dio seguimiento durante 41 años, y se estimaron las funciones de crecimiento mediante regresión multinivel para todo el período se determinó que la aplicaciones de 600 g árbol⁻¹, 800 g árbol⁻¹ y 1000 g árbol⁻¹ en régimen alterno o continuo de (NPK) fueron superiores con respecto al testigo; el tratamiento de la aplicación de una dosis única de 300 g árbol⁻¹ de (NPK) provocó valores inferiores con respecto al testigo.

Palabras clave: fertilización mineral, cantidad, frecuencia, rendimiento

Recibido: 14/03/2019

Aceptado: 30/07/2020

INTRODUCCION

Los efectos beneficiosos que ejercen los fertilizantes sobre la biología de las plantas son bien conocidos. Sin embargo, su aplicación incorrecta, tanto en exceso como en defecto, puede acarrear consecuencias negativas ⁽¹⁾.

En Cuba, en la rama forestal y a nivel de producción, el uso de fertilizantes químicos es mínimo y su dosificación deja mucho que desear pues, en el mejor de los casos, se emplea tentativamente, aun antes de estudios e investigaciones.

Una conífera autóctona de Cuba es *Pinus caribaea* var. *caribaea*. Por su alta plasticidad ecológica y rápido crecimiento - entre los pinos cubanos - ha sido utilizada ampliamente en los planes de reforestación en todo el archipiélago cubano. Este árbol, crece naturalmente en suelos poco fértiles ⁽¹⁾.

Sin embargo, las plantaciones establecidas en suelos Alíticos de Baja Actividad Arcillosa Rojo y Rojo Amarillento de la provincia de Pinar del Río, que originalmente constituyeron su hábitat y que fueron marginadas posteriormente por la agricultura, en general, no corresponden con el potencial productivo de la especie, debido a bajos incrementos medios anuales de volumen maderable ⁽¹⁾.

Uno de los períodos más críticos para el desarrollo de las plantaciones forestales es el establecimiento, durante el cual existe una demanda nutritiva creciente. Por ello, durante dicho periodo, la fertilización y el control de malezas se utilizan como prácticas silviculturales ⁽²⁾.

La fertilización estimula el crecimiento de los árboles y los hace más competitivos frente a las malezas, lo cual no impide realizar un control adecuado de estas ⁽³⁾. La acción combinada de estas dos prácticas debiera provocar un mejor crecimiento de los árboles; sin embargo, los resultados difieren dependiendo de las condiciones de cada sitio, como se ha observado en *Pinus radiata* D. Don ^(4,5).

Durante la década de los 70 se establecieron una serie de experimentos de fertilización en todo el país, en la Estación Experimental Agroforestal de Viñales, en un suelo Alítico de Baja Actividad Arcillosa. En este orden de ideas, se estableció un experimento de fertilización mineral que contemplaba aplicaciones fraccionadas de NPK con el objetivo de determinar las mejores dosis y frecuencias de fertilizante mineral NPK para obtener altos rendimientos en volumen de madera con corteza en plantaciones establecidas en estos suelos.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se estableció en la Estación Experimental Forestal de Viñales que se encuentra ubicada entre los 22° 37' longitud norte y los 83° 41' longitud Oeste y a una elevación de 150 m s.n.m ⁽⁶⁾.

Al inicio de la plantación los valores de temperatura fueron tomados de la Estación Meteorológica más cercana perteneciente a la ciudad de Pinar del Río según los cuales la temperatura media anual es de 24,7 °C y la máxima diaria de 28,7 °C, la mínima diaria de 20,4 °C y la mínima absoluta de 16,2 °C ⁽⁷⁾.

Se evaluó la respuesta a la fertilización en altura, diámetro y volumen a los 35 y 41 años ⁽⁵⁾, se comparan los diferentes tratamientos mediante ANOVA partiendo de un diseño de bloques al azar, ⁽⁶⁾ estudiaron la respuesta en altura y diámetro durante todo el período que duró el experimento, los resultados fueron evaluados mediante la determinación de curvas de crecimiento con el uso de la modelación multinivel. Se trabajó con los mismos datos empleados en estos artículos para determinar las dosis y las frecuencias de fertilizante mineral NPK más adecuadas para obtener volúmenes de madera superiores a la no aplicación de fertilizante, utilizando curvas de crecimiento en volumen mediante la modelación multinivel.

Diseño experimental

El experimento da continuidad a una serie de mediciones realizadas sobre los mismos árboles desde el año 1971, por un grupo de autores ⁽⁸⁾, a un ensayo de fertilización diseñado en bloques al azar con cuatro réplicas y ocho tratamientos, establecido por la Estación Experimental Forestal de Viñales que contemplaron aplicaciones fraccionadas de NPK con fórmula 8-10-10 (Tabla 1), se probaron cuatro dosis de fertilizante mineral NPK 300, 600, 800 y 1 000 g árbol⁻¹, con dos frecuencias de aplicación en años alternos y continuos.

Tabla 1. Diseño experimental

Tratamiento	Edad (Años)					Dosis Total		
	Código	1	2	3	4	5	g árbol ⁻¹	kg ha ⁻¹
T1. testigo	0	0	0	0	0	0	0	0
T2. 300	300	0	0	0	0	0	300	333
T3. 600	200	400	0	0	0	0	600	667
T4. 600 A	200	0	400	0	0	0	600	667
T5. 800	200	200	400	0	0	0	800	889
T6. 800 A	200	0	200	0	400	0	800	889
T7. 1000	200	200	400	200	0	0	1000	1111
T8. 1000 A	200	0	400	0	400	0	1000	1111

A: años alternos

El fertilizante (NPK) se aplicó en surcos, en forma de media luna, alrededor de las plántulas. Estas fueron plantadas según el método de hoyo, la misma se aplicó a inicios del período lluvioso en el mes de julio durante los cinco primeros años de establecida la plantación. La procedencia de las semillas fue de la masa semillera Marbajitas. El marco de plantación fue de 3 x 3 m. El tamaño de las parcelas fue de 225 m² con un total de 25 árboles y nueve en la parcela útil. Los árboles de la parcela útil fueron etiquetados y se dio seguimiento durante todo el período que duró el ensayo.

El experimento se estableció en el año 1971 por la Estación Experimental Forestal Viñales y las aplicaciones de fertilizantes comenzaron en este año hasta 1976.

El suelo en el cual se estableció la plantación está clasificado como Ultisols⁽⁹⁾ y clasifica como un Alisol y Alítico de Baja Actividad Arcillosa^(10,11), con pendientes del 4,3 %, derivados de esquistos cuarcíticos y pizarras. La profundidad total del suelo es de 1,15 m; pero, debido a la acumulación de arcilla en el horizonte B y al drenaje interno deficiente, factores que limitan la penetración de las raíces, la profundidad efectiva es de 20 cm⁽¹⁾.

Mediciones dasométricas

Para evaluar la respuesta de la especie a la fertilización se calculó la cantidad de árboles vivos ha⁻¹, se midió la altura y el diámetro a 1,30 cm del suelo de los árboles de la parcela útil, con hipsómetro y forcípula, respectivamente.

Se cuentan con mediciones desde el año 1973 a la edad de dos años de los árboles hasta 2012 (41 años de edad), este trabajo estudia el comportamiento de las principales variables dasométricas ante las diferentes dosis y frecuencias del fertilizante mineral aplicado.

Los árboles vivos ha⁻¹: se estimaron a partir del número de árboles vivos en la parcela útil.

La altura se midió y evaluó a los 2, 6, 8, 15, 33, 35 y 41 años de edad de la plantación, la cantidad de árboles vivos ha⁻¹ y el diámetro a los 6, 8, 15, 33, 35 y 41.

Altura (h): se realizaron con regla graduada hasta los dos años de la plantación y con hipsómetro de, Blume – Leiss, cuando sobrepasaban los cinco metros.

Diámetro (d): con forcípula graduada a 1,30 m del suelo.

Los volúmenes de madera correspondientes a cada una de las parcelas se calcularon sumando los volúmenes de los árboles sobrevivientes, de esa manera los volúmenes valorados reflejaron los cambios en la cantidad de árboles vivos por hectárea, los cuales fueron estimados a partir de los seis años de edad y se calcularon, teniendo en cuenta la cantidad de árboles vivos por hectárea, por la fórmula de Hubert:

$$V = \pi/4 * 10^{-4} * d^2 * h * C_f$$

donde:

V - volumen de madera por árbol, m³ árbol⁻¹

D_{1.30} - diámetro a 1,30 m del suelo (cm)

h - altura (m)

C_f - coeficiente mórfico, (0,5 para *P. caribaea*)

Análisis estadístico

Para estimar el efecto de las diferentes dosis y la frecuencia del fertilizante mineral aplicado sobre el crecimiento de la variable volumen en árboles individuales se estimaron curvas de crecimiento con el uso de la modelación multinivel ⁽¹²⁾, se utilizó el programa MLwiN versión 2.02. Se definen dos niveles, las medidas repetidas constituyen el nivel 1 anidadas en los individuos, los árboles, nivel 2. El modelo multinivel general es el siguiente:

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \sum_{p=1}^P \gamma_{p0} X_{p_{ij}} + \sum_{q=1}^Q \gamma_{0q} Z_{qj} + \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^P \gamma_{pq} Z_{qj} X_{p_{ij}} + u_{0j} + \sum_{p=1}^P u_{pj} x_{p_{ij}} + e_{ij}$$

donde:

Y_{ij} : valor de la variable resultado para el instante i en el individuo j

P variables explicativas X_p en el nivel 1 (p =1 P)

Q variables explicativas Z_q en el nivel 2 (q=1 Q)

u_{0j} : efecto aleatorio del nivel 2

e_{ij} : errores de nivel 1

Se asume que los errores e_{ij} siguen una distribución normal con varianza σ^2 .

Se ajustan varios modelos para la variable respuesta volumen de madera, seleccionándose el mejor a partir de los valores de desviación como indicador de calidad del ajuste. Se trabaja con un nivel de significación del 5 %.

Se ajustaron modelos de crecimientos jerárquicos donde la variable dependiente fue el volumen y las variables independientes la edad y los tratamientos.

Los tratamientos se introducen en el modelo como variables categóricas siendo la categoría de referencia el testigo (T1). Se utilizó el paquete estadístico Mini 2.1.

Se realizaron análisis univariados de la varianza y pruebas de comparaciones múltiples de Duncan y Bonferroni, para la variable incremento medio anual (IMA).

Análisis económico

Para el cálculo del beneficio económico solo se tuvo en cuenta el volumen de madera en $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a la edad de 41 años de la plantación (Tabla 2), el costo de los fertilizantes en CUP (\$ 2 800,00), el costo de aplicación de fertilizante de \$ 81,60 (CUP) y el valor del m^3 de madera en bolo (\$ 73,30) ⁽¹³⁾.

Tabla 2. Volúmenes de madera ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) por tratamientos y edades

Edad	Tratamientos							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
6	10,4	12,6	17,0	17,4	18,1	16,8	21,1	18,0
8	18,7	22,9	29,5	33,0	33,5	35,5	39,7	32,8
15	81,5	88,2	130,9	152,9	144,2	150,8	160,4	150,7
33	268,5	203,2	280,4	316,7	311,3	335	347,1	324,5
35	314,0	293,5	373,6	395,2	369,0	442,9	436,5	426,1
41	381,8	364,8	505,2	518,6	524,5	563,9	544,5	527,3

El beneficio económico se calculó por la fórmula:

$$BE = (V_n - V_0) C - C_{\text{fer}}$$

donde:

V_n - volúmenes de madera para un tratamiento n

V_0 - volumen de madera para el testigo

C - costo de la madera de pino en bolo (CUP. m^3)

C_{fer} - costo de los fertilizantes (CUP t^{-1})

La relación Valor/Costo (V/C) se calculó por la siguiente expresión ⁽¹⁴⁾:

$$V/C = \{(V_n - V_0) \times C - C_{\text{fer}}\} / C_{\text{fer}}$$

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Para evaluar la respuesta a largo plazo a la fertilización mineral aplicada según el ensayo establecido, se mide el nivel de respuesta a partir de variables e indicadores que miden potencial productivo en cada uno de los tratamientos. Además, se establece la comparación entre los mismos, con énfasis en el contraste con el tratamiento testigo.

Respuesta a la fertilización expresada en volumen de madera con corteza

Todos los tratamientos con fertilizante mostraron diferencias significativas con respecto al tratamiento testigo, excepto el tratamiento T2 donde se aplicó una única dosis de fertilizante (Tabla 3) donde se asegura ⁽¹⁵⁾ que las coníferas necesitan nutrientes para crecer y cuando no los consiguen en niveles adecuados, presentan problemas con su desarrollo y crecimiento, debido a los desequilibrios nutrimentales que provoca la aplicación de dosis por debajo de los niveles requeridos ⁽⁸⁾.

Tabla 3. Medidas descriptivas para el volumen por tratamiento, por edad y tratamientos

		Tratamientos								
Edad		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Total
6	N	1019	1111	1019	1080	1019	1050	1080	1080	1057
	Medias	10,78	12,56	16,98	17,35	18,11	16,80	21,13	18,03	16,47
	SD'S	4,11	4,80	3,82	3,56	4,50	7,18	5,20	4,23	5,25
8	N	895	988	1019	1050	957	926	1019	988	980
	Medias	16,04	20,24	29,50	31,87	31,27	31,95	36,94	30,40	28,53
	SD'S	6,47	5,62	6,12	9,24	6,29	11,85	10,57	11,82	10,17
15	N	895	988	1019	1050	957	926	1019	988	980
	Medias	81,51	88,23	130,88	152,91	144,15	150,83	160,43	150,70	132,45
	SD'S	34,65	14,34	26,76	37,05	17,99	31,67	9,16	40,82	38,51
33	N	803	834	926	957	833	834	864	895	868
	Medias	268,50	203,17	311,29	316,66	280,45	334,97	347,10	324,55	298,33
	SD'S	34,64	52,56	27,62	31,08	50,71	104,40	2,60	34,04	62,65
35	N	710	772	864	833	803	803	834	803	803
	Medias	314,04	284,98	373,58	395,20	368,97	426,09	436,55	442,95	380,29
	SD'S	31,66	78,66	48,76	82,34	83,46	115,46	12,36	58,74	82,88
41	N	679	648	864	833	803	772	834	803	779
	Medias	381,84	364,84	492,58	555,16	505,22	527,32	544,50	563,91	491,92
	SD'S	26,61	87,11	45,62	90,13	112,74	167,82	23,55	93,07	109,60
	N	834	890	952	967	895	885	942	926	7291
	Medias	178,79	162,34	225,80	244,86	224,69	247,99	257,77	255,09	224,67
	SD'S	31,26	29,29	37,68	41,93	38,65	43,99	41,45	43,77	189,81

N: número de árboles ha⁻¹, Medias: m³ ha⁻¹, SD'S: desviación estándar (m³ ha⁻¹)

El modelo 1 sin predictores solo estima el valor de la constante. El modelo 2 incluye la velocidad del crecimiento en volumen (coeficiente de la edad) y la aceleración de este crecimiento (coeficiente de edad al cuadrado) y el término edad al cubo. La inclusión de estos términos eleva significativamente la calidad del modelo con una disminución en la -2ll de 448,49. El modelo 3 incluye los tratamientos, además de los efectos del crecimiento, hay una mejoría significativa con respecto a los modelos 1 y 2 (diferencia en -2ll 470,89 y 22,4, respectivamente), no se aprecian diferencias significativas entre el tratamiento 2 y el testigo.

El modelo 4 resultó el de mayor poder explicativo, solo se incluyen las interacciones edad*tratamiento y los términos asociados al crecimiento. Las interacciones significativas indican que la velocidad del crecimiento en volumen con la edad depende del tratamiento a que se ha sometido la plantación.

El signo negativo del coeficiente de edad*T2, estadísticamente significativo, es un indicador de que, con este tratamiento, con el paso del tiempo el incremento en volumen es inferior al del tratamiento testigo que es la categoría de referencia.

Para los tratamientos T3, T4, T5, T6, T7 y T8, entre los cuales no existen diferencias significativas en el volumen medio, (Tabla 4), se obtuvo que la velocidad del crecimiento en volumen con la edad fue estadísticamente superior a la del tratamiento testigo.

Tabla 4. Coeficientes resultantes de los modelos multinivel para el volumen (m³ ha⁻¹), por tratamientos

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Constante	224,67	23,43	-22,46	8,79
Edad		7,101**	7,101**	14,89**
Edad ²		0,168**	0,168**	-0,589**
Edad ³				0,014**
T2			-16,45NS	
T3			47,01*	
T4			66,07**	
T5			45,91*	
T6			69,21**	
T7			78,98**	
T8			76,30**	
Edad*T2				-1,19NS
Edad*T3				2,30**
Edad*T4				3,38**
Edad*T5				2,10**
Edad*T6				3,48**
Edad*T7				3,84**
Edad*T8				4,074**
Error U _{0j}	0,00(0.00)	1 783,00	662,45	844,56
e _{ij}	35 841,55	2 655,52	2655,52	1 655,70
-2ll	2 558,85	2 110, 36	2087,96	2 012,82
R ²		0,926	0,926	0,954
Diferencia en -2ll				
Con modelo 1		448,49**	470,89**	546,03**
Con modelo 2			22,4**	97,54**
Con modelo 3				75,14**

*p < 0,05 **p < 0,01 NS: No significativo

e_{ij}: varianza entre medidas repetidas de cada parcela

Error U_{0j}: varianza entre parcela

R² Coeficiente de determinación para el modelo del nivel 1

La representación gráfica de los coeficientes de las variables asociadas a los tratamientos en el modelo 3 (Figura 1) muestra que los tratamientos T6, T7 y T8 a los que se aplicaron dosis de 800 y 1, 000 g árbol⁻¹ de NPK en régimen alterno o continuo tuvieron mejores respuestas en volumen de madera en m³ ha⁻¹ que el tratamiento testigo.

El tratamiento T2 al que se aplicó una dosis única 300 g árbol⁻¹ mostró resultados inferiores para esta variable que el tratamiento testigo.

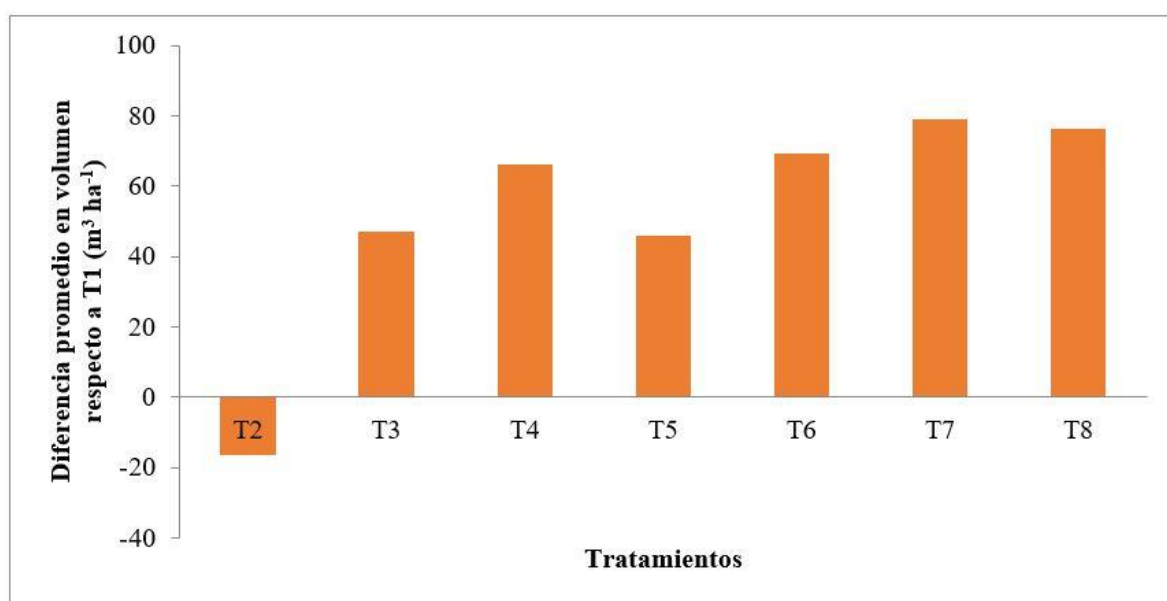


Figura 1. Coeficientes de las variables asociadas a los tratamientos, para el volumen, en el modelo 3 (covariables edad y tratamientos)

De forma general se observa que los tratamientos T6 (800 g NPK árbol⁻¹ A), T7 (1, 000 g NPK árbol⁻¹ C) y T8 (1 000 g NPK árbol⁻¹ A) se sitúan en el grupo de los que mayores diferencias muestran con relación al testigo, el tratamiento T7 donde se aplicó (1 000 g NPK árbol⁻¹) en años sucesivos resultó el tratamiento donde mayores valores se alcanzaron.

Otro autor plantea ⁽¹⁶⁾ que el efecto persistente por largos periodos de los fertilizantes aplicados a los árboles en sus primeros estadios de desarrollo, ha sido demostrado en diversas latitudes y se explica por el establecimiento del ciclo biogeoquímico después del cierre de las copas.

Al analizar el efecto de la fertilización mineral en el volumen correspondiente al tratamiento T2, los valores medios fueron inferiores al testigo en las últimas tres mediciones (como ocurre para la altura en el año 2004, 2006 y 2012 y para el diámetro

en el 2004) ^(5,6). Esto demuestra que con la aplicación de forma racional de nutrientes se pueden obtener incrementos en los rendimientos.

Existen pocas evidencias de respuestas a la fertilización nitrogenada al establecimiento de *P. radiata* ⁽¹⁷⁾; sin embargo, es común observar un mayor crecimiento y homogeneidad de la plantación al primer año de crecimiento, en suelos erosionados de primera rotación de este pino.

Respuestas diferenciadas que oscilan de 2 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a 14,5 m³ ha⁻¹ año⁻¹, a la fertilización al establecimiento de plantaciones de *P. radiata* en diferentes sitios, a los cinco años de edad ⁽¹⁸⁾.

Estudios realizados donde ensayaron la fertilización con N y P en plantaciones de *Pinus taeda* con 240 kg ha⁻¹ de N y 60 kg ha⁻¹ de P en una dosis única (sin parcelamiento), y 60 kg ha⁻¹ de N más 60 kg ha⁻¹ de P, como fertilización en el momento de plantación y, luego de 2 años, se agregaron 180 kg ha⁻¹ de N (fertilización en diferentes dosis hasta totalizar los 180 kg ha⁻¹) ⁽¹⁹⁾.

Los autores verificaron luego de ocho años de mediciones, un aumento de 93 % en área basal y 39 % en volumen. Además, los autores concluyen que no hubo diferencias significativas entre las fertilizaciones únicas y en cuotas, a pesar de que la fertilización en cuotas es más interesante para no sobrecargar los costos iniciales de implantación de la plantación.

Incremento medio anual en volumen

Las pruebas de Shapiro Wilk dieron como resultado normalidad para todos los años con probabilidades superiores a 0,190 (Tabla 5). Los resultados de las pruebas de comparaciones múltiples de Duncan se observan en la (Figura 2) con el empleo de las primeras letras del alfabeto junto a las barras de error.

Tabla 5. Resultados de las pruebas de normalidad para los incrementos medios anuales (IMA) de volumen

Año	Estadístico	Sig
1977	0,965	0,374
1979	0,954	0,191
1986	0,982	0,854
2004	0,981	0,826
2006	0,979	0,765
2012	0,980	0,786

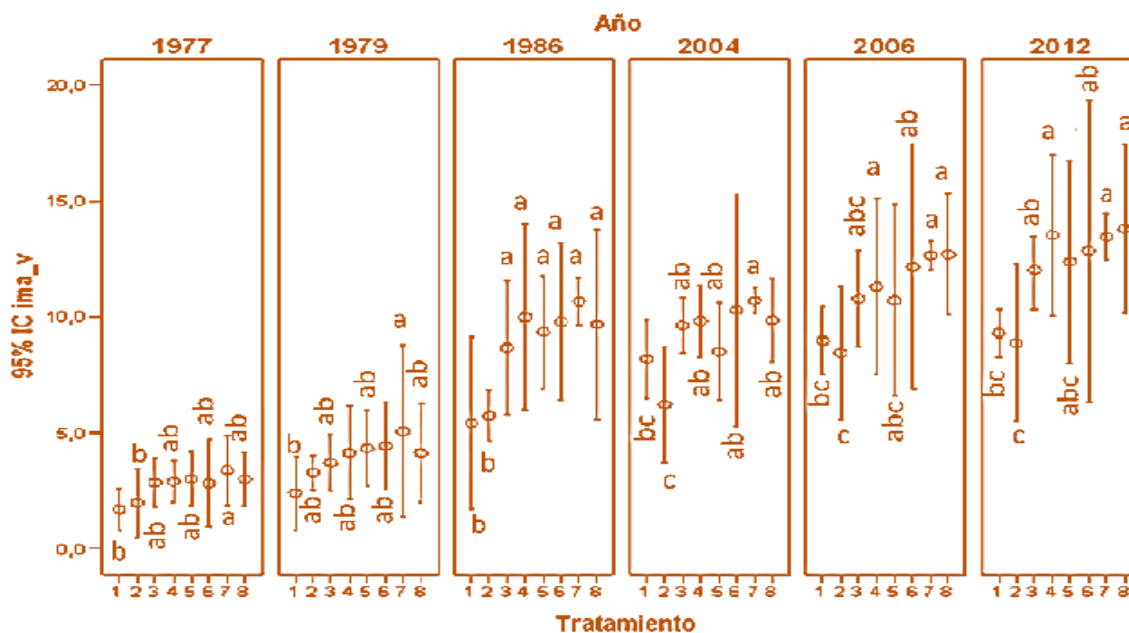


Figura 2. Barras de error de los valores de los incrementos medios anuales en volumen según los diferentes tratamientos y edades

Al evaluar la evolución en el tiempo de los incrementos medios anuales de volumen según los diferentes tratamientos (Figura 2), se determina un incremento del volumen superior a los $3,97 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ con relación al tratamiento T1 y T2.

En este último donde se aplicó la dosis más baja de fertilizante demostró que la adición de una pequeña cantidad de fertilizante solo en el primer año de vida, no es efectiva para el alcance de volúmenes óptimos, coincidiendo con los resultados obtenidos ⁽¹⁾ quienes manifiestan que cuando se realiza una sola fertilización inicial en los suelos Alíticos de baja actividad arcillosa no hay respuesta a la fertilización.

En el año 2004 los incrementos medios anuales de volumen correspondientes al tratamiento T2 fueron inferiores al testigo. Se observó que las dosis más altas de fertilizantes aplicadas en años sucesivos o alternos permiten los incrementos de volúmenes más altos, tal como ocurrió para la altura y el diámetro ^(5,6); El tratamiento T7 ($1\,000 \text{ g NPK árbol}^{-1}$) causó los mayores efectos en este indicador de crecimiento. Se recomienda la aplicación de $1\,800 \text{ g NPK árbol}^{-1}$ ⁽²⁰⁾, fraccionados en cuatro aplicaciones en años continuos, en un experimento establecido en la misma zona de estudio. Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican: i) que la aplicación fraccionada de *NPK* (fórmulas completas) en años alternos o continuos permite aumentar los rendimientos apreciablemente, y ii) la aplicación de fórmulas completas es más conveniente.

Los incrementos medios anuales en volúmenes promedio fueron diferentes significativamente en los tres últimos años de evaluación (Figura 2). En todos los años evaluados, los tratamientos donde se aplicaron dosis de fertilizante superiores a los 300 g árbol⁻¹ permitieron obtener incrementos en volúmenes superiores con respecto al T2, de igual forma se comportó el tratamiento testigo donde a pesar de no existir diferencias significativas con el T2 sus valores medios fueron superiores en 12,3; 4,4 y 3,6 % en los últimos tres años respectivamente.

En todos los años el tratamiento T7 donde se aplicó una dosis 1 000 g NPK árbol⁻¹ en años sucesivos fue el de mejor comportamiento, con diferencias apreciables con relación al testigo y al T2, exceptuando el año 1979 donde no hubo diferencias entre los tratamientos T2 y T7, otro autor coincide y plantea que un mal manejo de la dosis correcta, la fuente, del momento, o de la ubicación del fertilizante (N), y la falta de un balance apropiado con otros nutrientes esenciales pueden incrementar la pérdida total de N⁽²¹⁾.

Análisis económico

Los tratamientos T3, T4, T5, T6, T7 y T8 reportaron efectos económicos positivos, excepto el tratamiento T2 donde se aplicó una dosis mínima de 300 g árbol⁻¹, en la Figura 3 se presentan las diferencias en beneficio económico y la relación valor / costo de los tratamientos con respecto al testigo. Las ganancias para los tratamientos del T3 al T8 están por encima de los \$ 6 000 ha⁻¹, destacándose el tratamiento T8 con la mayor ganancia, superior a los \$ 9 992 ha⁻¹, las pérdidas ocasionadas en el tratamiento T2 fueron inferiores a \$ 2 300 ha⁻¹ a los 41 años de edad de la plantación y las relaciones V/C para los tratamientos T3, T4, T5, T6, T7 y T8 fueron superiores a dos, valor que, según recomienda⁽¹⁴⁾, es aceptable para una inversión en fertilización.

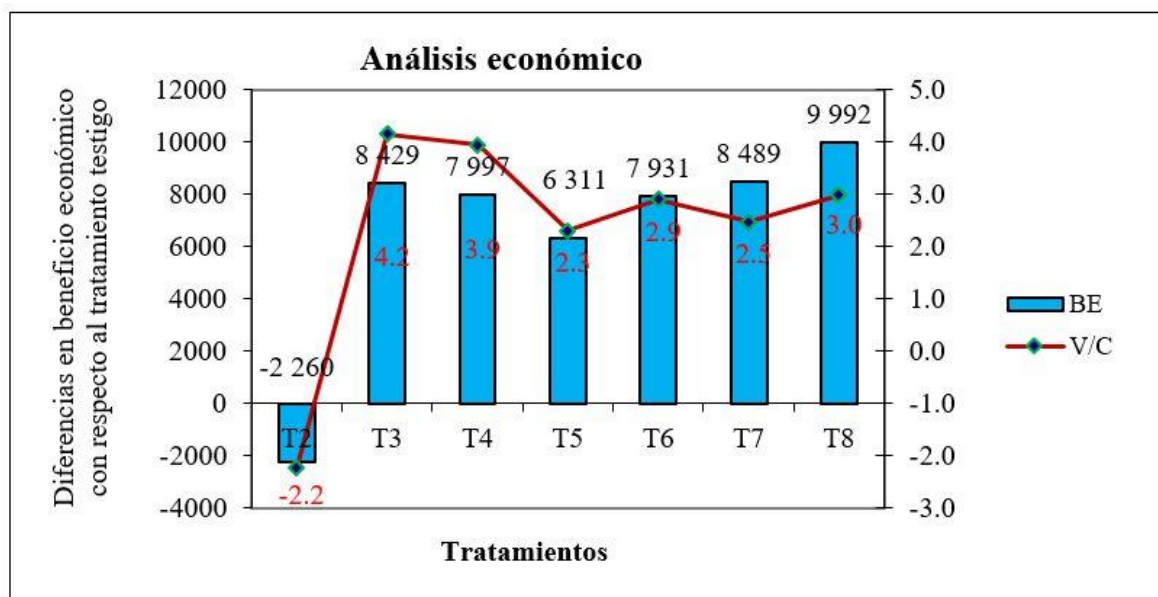


Figura 3. Análisis económico del experimento sobre aplicación de fertilizantes minerales en un suelo Alítico de Baja Actividad Arcillosa

De forma general los tratamientos T3, T4, T6, T7 y T8 fueron los de mejores resultados alcanzados destacándose el T8 con un beneficio económico superior a los \$ 9 992 ha⁻¹ y una relación valor/costo superior a 2,5. Es importante resaltar que el tratamiento T7 se ha comportado como el más estable en todas las variables evaluadas durante todo el proceso de desarrollo de este trabajo en el análisis económico, a pesar de obtener una relación valor/costo de 2,5 inferior a otros tratamientos, su beneficio económico es superior a los \$ 8 000 ha⁻¹. Cualquiera de estas últimas variantes representa una opción atractiva para el manejo silvícola, en dependencia del fertilizante que se disponga y del uso al que se destine la madera, en aras de obtener el máximo de rendimiento en volumen, así como las mayores ganancias y la mejor relación valor/costo ⁽²²⁾.

CONCLUSIONES

- Los resultados que se presentan tienen repercusión para la práctica productiva pues constituyen una vía ecológicamente sostenible y económicamente viable para obtener producciones de madera mayores, en tiempo y espacio menores.
- Las dosis de fertilizante mineral de 600 g árbol⁻¹, 800 g árbol⁻¹ y 1 000 g árbol⁻¹ permitieron obtener volúmenes de madera con corteza superiores al tratamiento testigo, el tratamiento donde se aplicó una única dosis de 300 g árbol⁻¹ resultó el tratamiento de más bajos rendimientos inferiores a los alcanzados por el tratamiento testigo.

- Los tratamientos del T3 al T8 fueron los de mayor beneficio económico con una relación valor/costo igual o superior a 2,5.

RECOMENDACIONES

- Aplicar 1 000 g árbol⁻¹ de fertilizante mineral (NPK) de forma continua, fraccionada en dosis de (200, 200, 400 y 200 g árbol⁻¹ en los primeros cuatro años) para el establecimiento de plantaciones de *P. caribaea* en los suelos ácidos en Pinar del Río.
- Aplicar para el establecimiento de plantaciones forestales, las dosis de 600 g árbol⁻¹, 800 g árbol⁻¹ o 1 000 g árbol⁻¹ de fertilizante mineral (NPK), fraccionadas.
- Aplicar 1 000 g árbol⁻¹ de fertilizante mineral (NPK) de forma alterna o continua en aras de obtener el mayor beneficio económico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Herrero G, Muniz O. Nutrición de plantaciones de *Pinas Caribaea* var. *Caribaea*: Respuesta a la fertilización y métodos de diagnósticos. 2001.
2. Stevenson MA, McGowan S, Anderson NJ, Foy RH, Leavitt PR, McElarney YR, et al. Impacts of forestry planting on primary production in upland lakes from north-west Ireland. *Global change biology*. 2016;22(4):1490–504.
3. Venegas R, Palazuelos R. Control químico de malezas arbustivas y arbóreas en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque*. 1999;20(1):79–88.
4. Reyes-Millalón J, Gerding V, Thiers-Espinoza O. Fertilizantes de liberación controlada aplicados al establecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*. 2012;18(3):313–28.
5. Reyes Pozo JL, Herrero Echeverría G, León Sánchez MA, Miñoso Bonilla Y, Curvelo Gómez S. Respuesta a la fertilización de plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en su hábitat natural en diferentes edades. 2014;
6. León-Sánchez MA, Reyes-Pozo JL, Herrero-Echeverría G, Pérez-León VE. Efecto de la fertilización sobre el crecimiento en diámetro y altura de *Pinus caribaea* en plantaciones del occidente de Cuba. *Madera y bosques*. 2016;22(3):87–101.
7. Awan AB, Frías G. Los suelos de la estación experimental forestal de Viñales, Pinar del Río. *Baracoa*. 1970;2(1):19–30.
8. Herrero G, González M, Fuentes I, Herrera P, García A, Coto O. Fertilización a *Pinus caribaea* en su hábitat natural y diversidad vegetal asociada. In Heredia, Costa Rica: Inisefor; 2004. p. 18.

9. Soil Survey Staff. Claves para la Taxonomía de Suelos. 12th ed. Estados Unidos: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio de Conservación de Recursos Naturales; 2014.
10. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources 2015; Reports No. 106. FAO: Rome; 2014.
11. Hernández J, Pérez J, Bosch I, Castro SN. Clasificación de los suelos de Cuba. San José de las Lajas, Cuba: Ediciones INCA; 2015.
12. Goldstein H. Multilevel statistical models. Vol. 922. John Wiley & Sons; 2011.
13. Hernandez M, Gómez T, Molina J, León MA, Caballero R. Efficiency in forest management: A multiobjective harvest scheduling model. Journal of Forest Economics. 2014;20(3):236–51.
14. FAO. Guía de fertilizantes y nutrición vegetal. Boletín FAO N° 9: Fertilizantes y nutrición vegetal. 1986. 198 p.
15. Reyes Pozo JL, León Sánchez MA, Herrero Echeverría G. Fertilización fraccionada en plantaciones de *Pinus* en suelos alíticos. Publicia; 2017.
16. Reyes JL. Fertilización fraccionada en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* y su impacto sobre algunos indicadores ambientales. Tesis de doctorado. Ciencias Forestales. Facultad de Agronomía y Forestal; 2016.
17. Ojeda H, Rubilar RA, Montes C, Cancino J, Espinosa M. Leaf area and growth of *Chilean radiata* pine plantations after thinning across a water stress gradient. New Zealand Journal of Forestry Science. 2018;48(1):10.
18. Rodríguez J, Álvarez J. Nutrición y fertilización de las plantaciones forestales. Santiago de Chile: Forestal Mininco SA. 2010;
19. Jokela EJ, Stearns-Smith SC. Fertilization of established southern pine stands: effects of single and split nitrogen treatments. Southern Journal of Applied Forestry. 1993;17(3):135–8.
20. Herrero G, Romeu P, Garcia A, Rivero M, Geigel FB. Efecto de niveles y portadores fosforicos en el desarrollo de *Pinus caribaea* var. *caribaea* II. Suelo Fersialitico Rojo perusco Ferromagnesial. Centro de Información y Documentación Agropecuario: La Habana, Cuba; 1989.
21. Chinchay LSL. Buenas prácticas agrícolas: uso de los fertilizantes nitrogenados en la minimización de la emisión de gases de efecto. Revista Científica Ingetecno. 2015;4(1).

22. Reyes Pozo JL, León Sánchez MA, Herrero Echeverría G. Influencia de la fertilización mineral sobre la retención de carbono en una plantación de pino. *Revista mexicana de ciencias forestales*. 2019;10(51):4-22.