

INVESTIGACION PRELIMINAR DE UN ENSAYO DE FERTILIZANTE DEL PINUS CARIBAEA VAR. CARIRAEA: UN ESTUDIO REPRESENTATIVO DE DISEÑO Y ANALISIS.

Por J. Burley¹⁾, A. B. Awan²⁾ y G. Frías³⁾

SUMARIO

En Octubre, de 1967, fue establecido un ensayo de 18 tratamientos de fertilizantes, en una plantación de Pinus caribaea var. caribaea Barrett y Golfari, en Viñales, Pinar del Río, Cuba. Para ilustrar los principios de diseño y análisis de los experimentos factoriales, se usaron los datos sobre la altura a los 9, 19 y 37 meses.

Los fertilizantes orgánicos no tuvieron efecto sobre la altura a los 19 y 37 meses, pero interactuaron con los efectos de los fertilizantes inorgánicos. En cada fecha de medición la altura aumentó linealmente con el NPK, en aumento, a través del rango de 0-100 kg/há y, a los 37 meses, hubo evidencia de una disminución cuadrática con 100 kg/há. Las comparaciones de fertilizantes con 2 componentes seleccionados, indicaron la importancia del nitrógeno y del fósforo.

1) Genetista forestal, Instituto Forestal de la Mancomunidad, Oxford, Inglaterra. Consultor de FAO en Mejoramiento Arboles Forestales y Biometría en Cuba, septiembre de 1969 y marzo de 1971.

2) Experto de FAO en Suelos Forestales y Fertilizantes, Proyecto Cuba 3 INDAF, Siboney, Habana, Cuba.

3) Homólogo de Suelos Forestales, INDAF.

SUMMARY

In October 1967, a trial of 18 fertiliser treatments was established in a plantation of *Pinus caribaea* var. *caribaea* Barrett and Golfari, at Viñales, Pinar del Río province, Cuba. Data on height at 9, 19 and 37 months were used to illustrate the principles of design and analysis of factorial experiments.

Organic fertilisers had no effect on height at 19 and 37 months but did interact with the effects of inorganic fertilisers. Height at each date increased linearly with increasing NPK through the range 0-100 **kg/ha** and at 37 months there was evidence of a quadratic decrease with 100 **kg/ha**: Comparisons of selected 2 component fertilisers indicated the importance of nitrogen and phosphorus.

SOMMAIRE

Un essai comportant 18 traitements de fertilisants, dans une plantation de *P. caribaea* var. *caribaea* Barrett et Golfari, a été établi en octobre 1967, à Viñales, Province Pinar del Río, Cuba. Les mesures en hauteur à l'âge de 9, 19 et 37 mois ont été utilisées pour illustrer les principes du dispositif et de l'analyse expérimentale factorielle.

Les fertilisants organiques n'ont pas eu d'effet sur la croissance en hauteur à l'âge de 19 et 37 mois, mais ils y ont interféré dans l'action des fertilisants minéraux. La hauteur a cru de façon linéaire. À chaque période, NPK variant de 0 à 100 **kg/ha**, ensuite à l'âge de 37 mois on a constaté une diminution quadratique avec la dose de 100 **kg/ha**. Les comparaisons des fertilisants à 2 composants ont montré l'importance de l'azote et du phosphore.

INTRODUCCION

Cuando se inicia un programa de forestación, se necesita una investigación extensiva para determinar los sistemas óptimos de manipulación de semillas, la ordenación de viveros y la ordenación del campo. Esta investigación requiere habilidad en el diseño experimental y en el análisis estadístico.

Uno de los problemas principales en la etapa de campo, es probar el efecto de la fertilización en el establecimiento inicial y el crecimiento del árbol, en cada uno de los principales sitios de plantación. Sin embargo, es difícil decidir qué fertilizantes y niveles posibles se van a probar. Para economizar los recursos de campo, es esencial, por lo tanto, hacer una selección lógica de los fertilizantes y usar diseños experimentales que permitan la estimación precisa de los efectos del tratamiento con el menor gasto de tierra, árboles, fertilizantes y mano de obra.

El objetivo de este informe es examinar uno de los primeros experimentos de fertilizantes replicado, en las plantaciones forestales cubanas, para discutir sus ventajas y desventajas, e ilustrar un posible método de análisis estadístico.

Los ensayos de fertilizantes ofrecen, comúnmente, grandes oportunidades para hacer selecciones ilógicas de tratamientos y para usar diseños inapropiados. Por ejemplo, si se van a probar 4 factores, cada uno a 3 niveles, hay 81 combinaciones factoriales posibles; en un experimento de campo replicado, se requeriría un área grande para acomodar 81 parcelas en cada réplica completa. Por lo tanto, es deseable reducir el tamaño de cada réplica y esto se puede cumplimentar de 5 formas:

1. Reducir el número de árboles por parcela.
2. Reducir el número de tratamientos.
3. Usar un diseño de parcela dividida.
4. Usar un diseño confundido o réplica fraccional.
5. Usar uno de los complejos diseños de bloque incompleto.

Número de árboles por parcela. En varios experimentos forestales replicados éste ha oscilado desde 1 hasta 169, pero, generalmente, se usan 16 25, 36 y 49. La selección depende de la variación esperada entre:

1. Árboles en las parcelas — ésta es microambiental y la variación microgenética.
2. Parcelas en las réplicas — ésta es macroambiental, conjuntamente con un componente del efecto de interacción, tratamiento x réplicas.
3. Réplicas — ésta es macroambiental.

En el lugar donde se espera que las interacciones de las parcelas sean menores, pueden ser aceptables las parcelas pequeñas (16 - 25 árboles); si las interacciones son grandes, son deseables parcelas mayores (49 - 81 árboles), pero en éstas, puede medirse una parcela útil interior.

Número de tratamientos. Este se puede lograr si se selecciona, al azar, una pequeña muestra (digamos de 5-10) del número total (81) de combinaciones de fertilizantes. Sin embargo, es preferible seleccionar lógicamente, de modo que se logre una situación ortogonal en la que es aún posible examinar los efectos lineales de los niveles, dentro de los fertilizantes individuales; conjuntamente con las interacciones entre los fertilizantes. En

el caso hipotético de un arreglo factorial de **34** (81 tratamientos), el número mínimo de tratamientos que permitirían estos exámenes, se obtendría reduciendo el número de niveles de cada fertilizante a 2. El número de tratamientos está dado entonces por 2^4 , es decir, 16.

Sin embargo, si se desea estimar los efectos cuadráticos, se deben mantener tres niveles y puede ser necesario entonces usar los complejos diseños compuestos y rotativos (Cochran y Cox, 1957; Dillon, 1968); antes de usar este tipo de diseño, deben ser consultados biómetras profesionales.

Diseño de parcela dividida. Cuando se aplican 2 ó más tipos de tratamientos en una combinación factorial, se puede aplicar un tipo de tratamiento en parcelas relativamente grandes y otro en parcelas relativamente pequeñas, manteniendo aún una precisión aceptable para todos los estimados de las medias de tratamiento. Para evitar que todas las parcelas tengan el mismo tamaño grande, se puede usar un diseño de parcela dividida. Este fue el diseño usado para el ensayo de Viñales que se discute más adelante.

Diseños confundidos y de bloque incompleto, replicación fraccional. Estos tipos de diseño son más difíciles de planificar, controlar y analizar; se debe buscar el asesoramiento de un biómetra profesional antes de establecer un ensayo de esta naturaleza. En los diseños confundidos, las interacciones de alto orden se confunden con las diferencias entre las semirréplicas y la precisión se reduce en la estimación de estas interacciones. En los diseños de bloque incompleto los tratamientos se disponen en grupos (bloques) que son más pequeños que las réplicas completas. Esto reduce la heterogeneidad del sitio dentro de los bloques.

En un arreglo factorial, cuando se van a probar muchos tratamientos, se promedian los principales efectos de éstos sobre muchas combinaciones de los otros tratamientos, aumentando así la replicación efectiva; esta replicación, y, por ende, el tamaño del experimento, se pueden reducir, omitiendo algunas combinaciones.

DESCRIPCION DEL ENSAYO

En octubre de 1967, los miembros del INDAF establecieron un ensayo en Viñales, Pinar del Río, para determinar el efecto de varias combinaciones de fertilizantes orgánicos e inorgánicos sobre el crecimiento del *Pinus caribaea* var. *caribaea* Barrett y Golfari. Los árboles fueron plantados con un espaciamiento cuadrado de 3 m en parcelas de 6 x 6 árboles; se aplicó el fertilizante en el momento de la plantación. Todos los árboles se midieron hasta la aproximación de **1 cm**, en julio de 1968, en mayo de 1969

y en noviembre de 1970; los datos fueron analizados en la computadora KDF 9, en la Universidad de Oxford. Las alturas no fueron determinadas inmediatamente después de la plantación, lo que es lamentable, porque la altura inicial se puede usar, a menudo, como una covarianza para explicar algunas de las variaciones observadas en la altura subsecuente.

Selección de los tratamientos de fertilizantes. Este ensayo pretendía probar los efectos de fertilizantes orgánicos (3 tipos: cachaza, ceniza y testigo o no tratamiento orgánico), conjuntamente con 3 fertilizantes inorgánicos (N, P_2O_5 y K_2O), en 3 niveles cada uno (0, 50, 100 **kg/há**). Luego, son posibles 81 combinaciones factoriales. (Esto está dado por **34**, es decir, 4 factores a 3 niveles cada uno). Como este número resulta prohibitivo, se hizo una selección de 18 tratamientos (Tabla 1). En esta selección se aplicaron 6 combinaciones de tratamientos inorgánicos, sin fertilizante orgánico, con cachaza y con ceniza; es, pues, simple y válido comparar los tratamientos orgánicos promediados sobre todas las combinaciones inorgánicas.



Vista del campo experimental de *Pinus caribaea* de Viñales

TABLA 1

Composición de tratamientos en kg/há de fertilizante

Código de tratamiento	Fertilizantes inorgánicos			Fertilizantes orgánicos	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	cachaza	ceniza
A	(testigo = control = no fertilizantes adicionales)				
B	—	50	50	—	—
C	50	—	50	—	—
D	50	50	—	—	—
E	50	50	50	—	—
F	100	100	100	—	—
G	—	—	—	1 000	—
H	—	50	50	1 000	—
I	50	50	—	1 000	—
J	50	—	50	1 000	—
K	50	50	50	1 000	—
L	100	100	100	1 000	—
M	—	—	—	—	1 000
N	—	50	50	—	1 000
Ñ	50	50	—	—	1 000
O	50	—	50	—	1 000
P	50	50	50	—	1 000
Q	100	100	100	—	1 000

Nota: Se aprecia la inconsistencia en la codificación de las combinaciones de tratamientos; compare el orden B, C, D con H, I, J y N, Ñ, O. Se aplicó el análisis a los datos de las combinaciones correctas de fertilizantes.

De manera similar, dentro de cada tratamiento orgánico, es posible probar el efecto de aumentar la combinación NPK. Había 3 niveles (0, 50 y 100 kg/há) de este modo era posible examinar los efectos lineales y cuadráticos (códigos de tratamiento A, E, F; G, K, L; M, P, Q).

Los tratamientos restantes (B, C, D; H, I, J; N, Ñ, O) añaden poca información. Aunque es posible extraer cada grado de libertad en la forma de contrastes (por ejemplo B v C, B v D; C v D) estos contrastes no proporcionan evidencia sobre el efecto de las interacciones entre N y P, N y K, P y K. Solamente es posible colocar en orden las combinaciones y hacer estimados intuitivos de la importancia relativa de sus elementos constituyentes.

Diseño experimental. El diseño seleccionado fue un arreglo de los tratamientos en parcelas divididas, en las que los fertilizantes orgánicos formaban las principales parcelas y los fertilizantes inorgánicos formaban las parcelas menores. La precisión del estimado de las medias de las parcelas principales está inevitablemente reducida en este tipo de diseño y es usual colocar en la parcela principal aquellos tratamientos que se espera tengan el mayor efecto. Se obtiene mayor precisión para los estimados de las medias de los tratamientos menores y de las interacciones. Así, en Viñales, se supuso que los tratamientos orgánicos serían más efectivos que los fertilizantes inorgánicos.

La distribución de los fertilizantes inorgánicos, dentro de los tratamientos orgánicos, fue sistemática, en todas las réplicas. Esto implica que no hay estimado válido del término de error de la parcela menor; de modo que todas las conclusiones subsecuentes acerca de los tratamientos inorgánicos están parcializadas. Sin embargo, se continuó el análisis, como si hubiera ocurrido la total aleatorización, con el fin de dar un ejemplo de este tipo de análisis.

MÉTODOS DE ANALISIS

El análisis básico aplicable a los datos de este tipo, es el análisis de varianza. Este divide la variación de los valores observados entre las fuentes de variación, tales como las réplicas, los tratamientos, o las interacciones, y prueba éstas en relación con la varianza residual o inexplicada (Tabla 2).

TABLA 2

Modelo para el análisis de varianza

Fuente de variación	Grados de libertad
Réplicas	3
Tratamientos orgánicos	2
Error de la parcela principal	6
Tratamientos inorgánicos	5
Efecto lineal cuando los 3 están presentes	1
Efecto cuadrático cuando los 3 están presentes	1
NP 50 VS. NK 50	1
NP 50 vs. PK 50	1
NK 50 VS. PK 50	1
Orgánico x inorgánico	10
Orgánico x NPK lineal	2
Orgánico x NPK cuadrático	2
Orgánico x contraste de NP/NK	2
Orgánico x contraste de NP/PK	2
Orgánico x contraste de NK/NF	2
Error de la parcela menor	45
Total	71

NOTA: Aunque hay sólo 5 grados de libertad para los tratamientos inorgánicos, es posible examinar el factorial 5: contrastes ($5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 120$) cada uno con 1 grado de libertad.

Estos no son independientes y los grados de libertad y las sumas de los cuadrados en esta sección y en la sección inorgánico x orgánico no son, por tanto, aditivos.

El análisis de varianza se aplica usualmente a cada característica medida. Sin embargo, es posible que el crecimiento pueda estar influido por el tamaño inicial de los árboles al plantarlos; aunque éstos (según los datos obtenidos) eran de un tamaño muy uniforme. Esto se puede examinar por el análisis de covarianza; la regresión se computa entre el incremento y la altura inicial y, si esta regresión es estadísticamente significativa, los valores medios se ajustan antes de comparar los tratamientos. Como se expresó anteriormente, esto no se puede realizar aquí, y el análisis de varianza se ha limitado, hasta ahora, a la altura en las 3 etapas (9, 19 y 37 meses después de plantar).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los principales análisis de varianza están resumidos en la Tabla 3; las medias y los errores estándares de las diferencias, están dados en la Tabla 4; y los rangos, en la Tabla 5. Se pueden extraer varias conclusiones importantes de estas tablas.

TABLA 3

RESUMEN DE LOS ANALISIS DE VARIANZA DE LA ALTURA (m) EN 3 ETAPAS

Fuente de variación	g. l.	9 meses		19 meses		37 meses	
		c.m.	F	c.m.	F	c.m.	F
Réplicas	3	0,0200	7,1*	0,2150	15,8**	2,150	34,7***
Tratamientos orgánicos	2	0,0170	6,0*	0,0067		0,102	
Residuo de la parcela principal	6	0,0028		0,0137		0,062	
Tratamientos inorgánicos	5	0,0017		0,0910	5,1***	2,310	13,5***
Orgánico x inorgánico	10	0,0010		0,0175		0,414	2,4*
Residuo de la parcela menor	45	0,0014		0,0179		0,171	

TABLA 4
MEDIAS Y ERRORES ESTANDARES DE LAS DIFERENCIAS PARA LA
ALTURA (m) EN 3 ETAPAS

Fuente de la media		9 meses	19 meses	37 meses	
Réplica	1 2 3 4	0,387 0,307 0,344 0,331	0,882 0,651 0,837 0,701	2,678 1,933 2,493 2,092	
	e. s. de las dif. ¹	0,018	0,039	0,083	
Orgánico	1 = Testigo 2 = Cachaza 3 = Ceniza e. s. de las dif.	0,323 0,373 0,331 0,015	0,776 0,748 0,778 0,034	2,225 2,350 2,322 0,072	
					Composición testigo no fertilizante P + K a 50 kg/ha N + K a 50 kg/ha N + P a 50 kg/ha N, P, K a 50 kg/ha N, P, K, a 100 kg/ha
Inorgánico	1 = A, G, M 2 = B, H, N 3 = C, J, O 4 = D, I, N 5 = E, K, I 6 = F, L, Q e. s. de las dif.	0,357 0,330 0,342 0,332 0,356 0,336 0,015	0,724 0,700 0,654 0,808 0,868 0,850 0,055	1,974 1,942 1,818 2,517 2,742 2,302 0,169	

Nota: Las letras de los códigos para los fertilizantes inorgánicos son las usadas en la Tabla 1

¹ e. s. de las diferencias = error estándar de las diferencias

TABLA 5

Orden que ocupan los tratamientos **en** las 3 etapas

		9 meses	19 meses	37 meses
Réplica	1	1	1	1
	2	3	3	3
	3	4	4	4
	4	2	2	2
Orgánico	1	2	3	2
	2	3	1	3
	3	1	2	1
Inorgánico	1	1	5	6
	2	5	6	5
	3	3	4	4
	4	6	1	1
	5	4	2	2
	6	2	3	3

El efecto de las diferencias entre las réplicas, se hizo más evidente a medida que los árboles envejecían. La significación de los efectos de las réplicas confirmó que el experimento estaba bien trazado sobre el terreno, de modo que la heterogeneidad estaba reducida al mínimo dentro de las réplicas, pero aumentada al máximo entre las mismas.

Los fertilizantes orgánicos tuvieron efectos significativos sobre el temprano crecimiento en altura. **A** los 9 meses los árboles tratados con cachaza tenían 0,37 m.de altura, comparados con los tratados con ceniza (0,33 m) y los testigos (0,32 **m**). **A** los 19 y a los 37 meses, no hubo dife-

rencias significativas entre los 3 tratamientos orgánicos. Es evidente que este ensayo se debe estudiar durante toda su rotación, para ver si la temprana aplicación de fertilizantes orgánicos está justificada; sobre la base de los resultados obtenidos después de 3 años, podemos decir que hay poca justificación para la adopción extendida de los tratamientos orgánicos en este tipo de suelo.

Los fertilizantes inorgánicos mostraron efectos inversos a los orgánicos. **A** los 9 meses no hubo diferencias significativas (oscilan de **0,33** a **0,36 m**). **A** los 19 meses (**0,65-0,87 m**) y a los 37 meses (**1,82-2,80 m**) hubo diferencias altamente significativas (Tabla 3), con órdenes razonablemente consistentes (Tabla 5).

Los tratamientos se pueden clasificar en 2 grupos principales. En uno no hubo virtualmente diferencias —testigo, PK_{50} y NK_{50} —y este grupo rindió consistentemente menos crecimiento en altura que el restante — NP_{50} , NPK_{50} y NPK_{100} .

Lo anterior se confirma por los contrastes individuales probados en la Tabla 6. **A** los 19 y 37 meses, NP_{50} fue significativamente superior a NK_{50} ó PK_{50} , pero PK_{50} y NK_{50} no fueron diferentes. Esto sugiere que pueden haber ocurrido interacciones de primer orden, que involucren particularmente N y P.

Cuando los 3 fertilizantes se aplicaron juntos, en cantidades iguales, hubo un aumento lineal en el crecimiento del árbol a los 19 y a los 37 meses. Además, a los 37 meses hubo evidencia de un efecto cuadrático (Tabla 6). Esto implica que la aplicación óptima del pico máximo puede ser menos de **100/kg/há**; el fertilizante adicional puede disminuir el rendimiento. Sin embargo, se examinaron los modelos de regresión para relacionar el crecimiento en altura de los diferentes niveles de todos los elementos fertilizantes y éstos contaron solamente para un cuarto de la variación total en altura. Se requiere un experimento más preciso.

TABLA 6

Razones de varianza (F) para la altura en las tres etapas para cinco contrastes individuales de tratamientos inorgánicos (con 1 en 45 grados de libertad).

Descripción del contraste o grado de libertad	Razón de varianza, F		
	9 meses	19 meses	37 meses
Efecto lineal de NPK 0, 50, 100	2,1	5,3 *	24,1 ***
Efecto cuadrático de NPK 0, 50, 100	0,5	2,9	5,9
NK 50 vs. NP 50	0,4	8,0 **	17,2 ***
PK 50 vs. NP 50	0,0	3,9	11,6 **
PK 50 vs. NK 50	0,6	0,7	0,5
NOTA: * Significativo a un nivel de probabilidad del 5,0 % ** Significativo a un nivel de probabilidad del 1,0 % *** Significativo a un nivel de probabilidad del 0.1 %			

Aunque los fertilizantes organicos no tuvieron un efecto promedio en la altura, a los 37 meses hubo alguna evidencia de una interacción entre los efectos de los tratamientos orgánicos y el efecto lineal de los tratamientos inorgánicos; esto implica que la combinación óptima de fertilizantes inorgánicos puede variar con los diferentes fertilizantes orgánicos. Ninguno de los elementos se aplicó sólo de manera que no es posible expresar sus efectos individuales. Sin embargo, las grandes diferencias ya aparentes a los 37 meses, indican que un fertilizante combinado NPK puede tener resultados beneficiosos; para economizar el uso de fertilizantes costosos, es deseable evaluar la naturaleza de la relación lineal cuadrática, durante toda la rotación.

CONCLUSION

Este ensayo es valioso porque demuestra algunos de los principios del análisis y del diseño experimental. Aunque la selección de las combinaciones de fertilizantes inorgánicos era inadecuada, para permitir el estimado de los efectos de la interacción entre el nitrógeno, el fósforo y el potasio, se han extraído algunas conclusiones provisionales. Se puede obtener un aumento en el crecimiento por la adición de NPK, a través del rango de 0-100 **kg/há**. Existe la sugerencia de que el nitrógeno y el fósforo son constituyentes importantes y de que ellos pueden interactuar. La adición de fertilizantes inorgánicos no tuvo efecto en la altura a los 19 y 37 meses, pero hubo alguna evidencia de interacción entre los efectos de los tratamientos orgánicos e inorgánicos.

La selección del diseño experimental y el trazado real sobre el terreno fueron adecuados, excepto para la distribución sistemática de los tratamientos inorgánicos dentro de las parcelas principales.