



9CFE-1517

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





Simulación de rentabilidad de la fertilización de establecimiento bajo diferentes escenarios basada en un modelo de *Pinus pinaster* ya existente en Galicia

PÉREZ-RODRÍGUEZ, F. (1) Y PRADA, E. (2)

(1) Fora Forest Technologies SLL, Campus Duques de Soria s/n, 42004 Soria.

(2) Centro de Investigación Forestal de Lourizán. Xunta de Galicia.

Resumen

La fertilización forestal se ha estudiado principalmente por su impacto en el crecimiento de las plantas por la aportación de macro y micronutrientes. Es una estrategia clave para aumentar la productividad de una plantación, pero también ayuda a reducir el estrés ambiental, las amenazas biológicas, así como puede mitigar riesgos económicos ante fluctuaciones del mercado.

El objetivo de este trabajo es analizar la rentabilidad de fertilizar en diferentes escenarios selvícolas para *Pinus pinaster* en Galicia, ya que los gestores forestales deben conocer su viabilidad económica. Para ello, se ha generado un simulador de crecimiento utilizando los modelos dinámicos y la desagregación de productos. Partiendo de diferentes inputs aleatorios y de datos de campo de un ensayo de fertilización de establecimiento, se realizaron simulaciones para diferentes escenarios económicos, ajustando varios parámetros, como precios de productos, inflación, etc. Con ello, se obtuvieron unas líneas rojas en cada esquema selvícola con los puntos críticos donde la fertilización sería rentable. Además, el simulador permite otro tipo de análisis en los que se puede introducir posibles variaciones de la calidad de estación debido al cambio de las condiciones climáticas.

Palabras clave

Software, simulaciones, modelos dinámicos, plantación forestal, productividad

1. Introducción

Fertilizar durante la plantación puede ser una estrategia para mejorar la productividad de las plantaciones forestales, ya que se presupone que puede acelerar el crecimiento, aumentar la resiliencia ante condiciones adversas y reducir costos operativos (SMETHURST, 2010). Sin embargo, esta presunción ha de ser estudiada y evaluada para poder contrastarla y asumirla como cierta. Además, es necesario estudiar la rentabilidad de invertir en fertilización teniendo en cuenta la variabilidad de los factores económicos, ya que, aun siendo cierta la primera hipótesis, ¿se amortiza el coste de la fertilización al final de turno? Aunque la respuesta del crecimiento a la fertilización es bien conocida, existe poca investigación sobre su rentabilidad (PUKKALA, 2017). Este trabajo trata de dar respuesta a si realmente la fertilización en plantaciones de *Pinus pinaster* en Galicia es recomendable o no.

Atendiendo al estado del arte, tenemos que los estudios sobre fertilización son escasos debido al tiempo requerido para obtener resultados. Por ejemplo, TRICHET et al. (2009) analizaron fertilizaciones en *Pinus pinaster* durante 15 años, identificando prácticas que favorecen el crecimiento. No obstante, correlacionar la fertilización con resultados de producción es una tarea complicada, ya que es muy difícil controlar todos los factores que intervienen, como la preparación del suelo o el impacto en plagas y enfermedades en el transcurso de su crecimiento (VARELIDES et al. 1995; ZAS et al., 2006).



En Galicia, el gobierno autonómico publicó una orden en el año 2014 en la cual se proporcionan diferentes modelos o itinerarios silvícolas para distintas especies forestales productivas, entre ellas para pino pinaster; con el objetivo de facilitar los trabajos para obtener de forma viable productos forestales de calidad, promover la gestión forestal sostenible y mejorar el estado selvícola de los montes gallegos (DOG, 2014), y fue modificada en febrero de 2021 (DOG, 2021). En dichas órdenes no se proporcionó información sobre la rentabilidad económica de cada uno de los itinerarios, y se indicó que la rentabilidad dependería directamente de la calidad de estación, de la posibilidad y facilidad de mecanización de las labores forestales y de los precios que alcanzarían en el futuro los productos forestales. La decisión de aplicar cada itinerario corresponde por tanto a los propietarios o gestores de las plantaciones.

Como anteriormente se mencionó, estos estudios requieren el paso de los años para evaluar su evolución, sin embargo, en este trabajo utilizamos simulaciones a partir de los modelos dinámicos generados por DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2009) para esta especie, con el fin de predecir resultados de crecimiento bajo distintos escenarios. Así pues, en este trabajo se comparan dos escenarios con o sin fertilización bajo diferentes itinerarios selvícolas y diferentes factores económicos.

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es simular el crecimiento de *Pinus pinaster* en diferentes escenarios para identificar las mejores condiciones que permitan evaluar la viabilidad económica de la fertilización

3. Metodología

Se divide la metodología en dos partes. En una primera utilizamos los datos obtenidos de las mediciones de campo del ensayo de fertilización de Frades (Galicia, noroeste de España, establecido en el año 20216 (Tabla 1). En él se utilizaron plántulas en contenedor de una savia, provenientes de una sola familia del programa de mejora genética de *Pinus pinaster* del Centro de Investigación Forestal de Lourizán. La preparación del terreno incluyó limpieza de matorral y subsolado lineal, con un espaciamiento de 4x2 m entre plantas. El experimento siguió un diseño de bloques al azar con un arreglo factorial 4^3 (factores N, P, K (nutrientes Nitrógeno, Fósforo y Potasio), con niveles de 0, 20, 40 y 60 g/planta), repetidos en cuatro bloques y con una unidad experimental de cuatro plántulas contiguas por bloque. Los tratamientos de fertilización se asignaron aleatoriamente dentro de cada bloque, y los fertilizantes se aplicaron manualmente alrededor de las plántulas inmediatamente después de la plantación. En total, el diseño experimental abarcó 64 tratamientos en cuatro bloques, con 1024 plantas en total. Anualmente se registraron las tasas de supervivencia y se midió la altura total de las plantas vivas, utilizando un Vertex® de Haglöf Sweden. Para este trabajo, simulamos estos datos de campo a futuro bajo tres itinerarios selvícolas diferentes (Tabla 2), y ciertos parámetros económicos, como puede ser la desagregación en diferentes destinos con sus precios (Tabla 3). Se trata con ello de ver las diferencias entre los datos con fertilización y sin fertilización, evaluando en una primera aproximación si este tratamiento se podrá amortizar a final de turno.

Tabla 1: Datos de las mediciones de la parcela fertilizada y sin fertilizar

Variable	Parcela fertilizada	Parcela sin fertilizar
----------	---------------------	------------------------

3/

Tabla 2: Itinerarios selvícolas aplicados, descripción y programación de claras.

Itinerario	1ª Clara	2ª Clara	Corta final		
PP1	15 años	dejar 750-900 pies/ha	25 años	opcional, dejando unos 650-700 pies/ha	Se corta con criterio de máxima renta en especie
PP2	15 años	dejar 650-700pies/ha	25 años	Dejar 400 pies/ha	Se corta con criterio de máxima renta en especie.
PP3	10 años	Extraer 450pies/ha	15 años	Extraer. 250 pies/ha	25 años

Tabla 3: Definición de destinos para su desagregación y precios utilizados en los escenarios de simulación en las simulaciones con datos de campo.

Destino	Diámetro en punta delgada	Precio (€/m3)
70		120
50		90
40		70
30		30
10		10

10

En una segunda parte, estableceremos simulaciones en base a rangos en las variables de entrada y utilizamos diferentes escenarios modificando los factores de mercado, tratando de jugar con ellos para obtener en cuales de ellos el tratamiento es amortizado a final de turno obteniendo beneficios o no. En específico, estos escenarios se basan en la variación de tres factores principales: i) las características iniciales de la masa forestal (densidad de plantación (N), área basimétrica (G), y altura dominante (H0)), ii) los precios de los productos: Se consideran los precios potenciales de la madera obtenida en aclareos intermedios y finales y iii) la tasa de retorno de la inversión. Aunque puede haber muchos más, estos factores permiten modelar y evaluar diversas estrategias de manejo forestal y su impacto económico.

Para la realización de todas las simulaciones en este trabajo, se ha desarrollado una herramienta informática para automatizar la utilización del modelo dinámico

de DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2009) en los diversos escenarios. Este simulador de crecimiento permite definir estados iniciales de las masas, esquemas silvícolas, aplicaciones o intervenciones específicas, y variables económicas como precios, inflación y tasas de retorno. Además del modelo dinámico, se automatizan los procedimientos de desagregación de productos utilizando las ecuaciones de perfil también de DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2009). Para ello se emplea una distribución de Weibull biparamétrica para obtener la distribución diamétrica y extraer el número de trozas en cada clase de destino definida. Este simulador se ha desarrollado como aplicación de escritorio de Windows utilizando C# (Framework 4.8.1).

4. Resultados

Se muestran primero los resultados obtenidos de las simulaciones con los datos de campo del ensayo de fertilización (Tabla 1). En estas simulaciones se aplican los itinerarios silvícolas PP1, PP2 y PP3 (Tabla 2) y se establece una tasa de descuento fija igual al 2% y los precios de desagregación por destinos que se establecen en la Tabla 3. Por último, se aplican tres escenarios de esquema silvícola (Tabla 3). Los resultados muestran que para el itinerario PP1 se alcanza mayor volumen en destinos mejor pagados en la parcela fertilizada en comparación a la parcela no fertilizada, tal y como se puede observar en la Tabla 4. Obteniéndose un resultado del Valor Añadido Neto de 4877,19€ en la parcela sin fertilizar y 6579,41€ en la parcela fertilizada. La gráfica de comparación de este itinerario se muestra en la Figura 1.

Tabla 4: Desagregación por destinos (volumen en corta final en m³) extraído en la simulación de la parcela fertilizada y no fertilizada aplicando el modelo silvícola PP1, PP2 y PP3.

Itinerario PP1	Itinerario PP2		Itinerario PP3			
Destino	No Fertilizada	Fertilizada	No Fertilizada	Fertilizada	No Fertilizada	Fertilizada
Destino 1						
Destino 2	2,16	4,42	2,16		4,42	
Destino 3	71,53	95,05	71,53	95,05	1,49	6,14
Destino 4	271,76	306,03	271,76	306,03	76,29	130,15
Destino 5	413,83	411,64	413,83	411,64	294,46	309,06
Restos	16,30	15,35	16,30	15,35	13,26	12,49

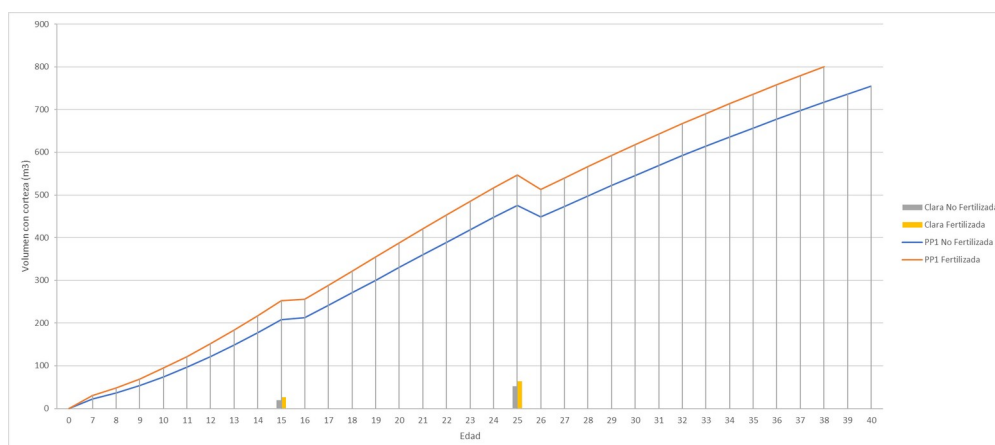


Figura 1: gráfica comparativa entre la parcela fertilizada y no fertilizada aplicando el modelo silvícola PP1

Si evaluamos el itinerario silvícola PP2, el volumen extraído en destinos mejor pagados es mayor en la simulación con los datos de la parcela fertilizada en comparación a la parcela no fertilizada, tal y como se puede observar en la Tabla 4. Con respecto al VAN, los resultados obtenidos en estas simulaciones son de 7719,27€ en la parcela sin fertilizar y 9458,28€ en la parcela fertilizada. La gráfica de comparación de este itinerario se muestra en la Figura 2.

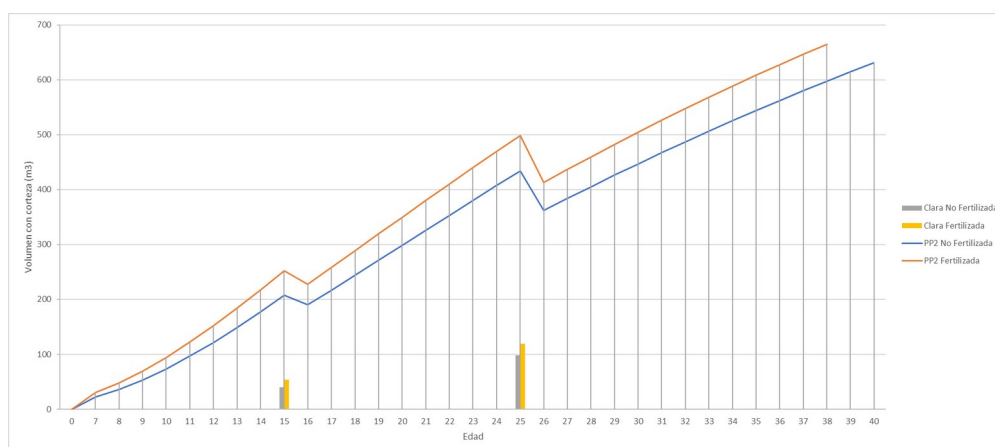


Figura 2: gráfica comparativa entre la parcela fertilizada y no fertilizada aplicando el modelo silvícola PP2

Por último, en estas simulaciones con los datos del ensayo de fertilización, evaluando el escenario silvícola PP3 se nota una diferencia entre los volúmenes por destinos mejor valorados entre la parcela fertilizada y la no fertilizada, sin embargo, esta no es tan grande como en los anteriores modelos PP1 y PP2, como se puede observar en la Tabla 4. Se ha de mencionar que aplicando este modelo PP3, la corta final se realiza de manera muy prematura con respecto a un turno de corta con criterio de máxima renta en especie, lo que puede afectar al VAN obtenido, que es de -1135,15€ (pérdidas) en la parcela sin fertilizar y 75,08€ en la parcela fertilizada. La gráfica de comparación de este itinerario se muestra en la



Figura 3.

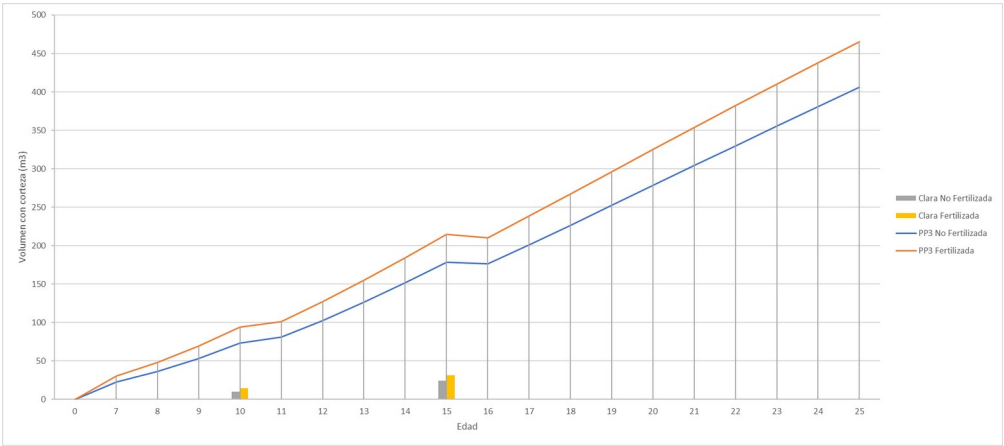


Figura 3: gráfica comparativa entre la parcela fertilizada y no fertilizada aplicando el modelo silvícola PP3

Con respecto a la segunda parte de los resultados, en la que se establecen rangos de H0 y G realizando incrementos diferenciales para diferentes densidades de plantación (750, 1000 y 1250 pies/ha), así como diferentes precios de destinos (Tabla 5) y tasas de retorno de inversión (2% ,3% ,4% y 5%), aplicando un itinerario selvícola fijo, que este caso ha sido la de una clara del 20% (en número de pies) a los 15 años y del 15% a los 25 años. Además, se establece un coste fijo para la plantación con fertilización de 3300€/ha, así como un coste fijo por aplicación de clara de 1100€/ha (a descontar de la posible ganancia que se tenga en esta operación por venta madera) y una inflación media del 2%. Finalmente, todas estas simulaciones se realizan para una edad de partida de 7 años, analizandose en cada caso si se obtiene beneficio o no, mostrandose esto en la Figuras 4, 5 y 6, donde se establecen las matrices con signos en rojo (saldo negativo), amarillo (sin apenas ganancia o pérdida) y verde (ganancia) para cada uno de los escenarios creados.

Tabla 5: Esquemas de precios aplicados en las simulaciones de variación de H0, G y N en diferentes escenarios económicos:

70	120	70	110	70	100
50	90	50	80	50	70
40	70	40	60	40	50
30	30	30	20	30	10
10	10	10		10	

N = 750		Precios 1					Precios 2					Precios 3				
		H0 (m)					H0 (m)					H0 (m)				
		6	6,5	7	7,5	8	6	6,5	7	7,5	8	6	6,5	7	7,5	8
Tasa = 5	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 4	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 3	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 2	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Figura 4: Matrices en las que se representa en verde como ganancia, amarillo como sin ganancia ni pérdida y rojo pérdidas en la evaluación económica bajo los escenarios definidos para una densidad inicial de 750 pies/ha

N = 1000		Precios 1					Precios 2					Precios 3				
		H0 (m)					H0 (m)					H0 (m)				
		6	6,5	7	7,5	8	6	6,5	7	7,5	8	6	6,5	7	7,5	8
Tasa = 5	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 4	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 3	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 2	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Figura 5: Matrices en las que se representa en verde como ganancia, amarillo como sin ganancia ni pérdida y rojo pérdidas en la evaluación económica bajo los escenarios definidos para una densidad inicial de 1000 pies/ha

N = 1250		Precios 1					Precios 2					Precios 3				
		H0 (m)					H0 (m)					H0 (m)				
		6	6,5	7	7,5	8	6	6,5	7	7,5	8	6	6,5	7	7,5	8
Tasa = 5	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 4	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 3	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tasa = 2	G m2/ha	4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●



Figura 6: Matrices en las que se representa en verde como ganancia, amarillo como sin ganancia ni pérdida y rojo pérdidas en la evaluación económica bajo los escenarios definidos para una densidad inicial de 1250 pies/ha

5. Discusión

Los resultados obtenidos nos permiten hacer una discusión preliminar, ya que estos resultados son obtenidos de simulaciones, que tendrán que ser contrastados con datos empíricos de futuras mediciones en los ensayos de fertilización. Independientemente de eso, se puede apreciar que, en las simulaciones a partir de los datos de campo, se obtienen mejores resultados con los datos con fertilización en todos los itinerarios aplicados, así como ya se podía intuir de trabajos como el de TRICHET et al. (2009) o de ARIF ALI et al. 2014. Si bien, es verdad que en el itinerario PP3 casi no se amortiza el coste de la fertilización con los parámetros económicos establecidos. Esto es un punto para tener en cuenta, ya que se podría afirmar con estos primeros resultados que fertilizar incrementa la producción, pero en realidad hay evaluar hasta qué punto ese aumento en la producción amortiza el gasto de la aplicación de la fertilización. La respuesta a este punto no es trivial, ya que, por ejemplo, se puede observar que la aplicación de un itinerario u otro afecta a este rendimiento económico. Es muy probable que con un itinerario selvícola de turno muy corto en el que el producto final tenga un menor valor económico no sea realmente rentable hacer esta fertilización inicial. Si observamos los resultados de la segunda parte de la metodología aplicada, donde se establecen rangos de inputs de entrada y diferentes precios y parámetros económicos, se puede observar que no siempre se amortiza el coste de la fertilización.

Teniendo que cuenta que, a mayor tasa de descuento, menor es el beneficio obtenido, como suele ser lógico. Además, a mayores precios de venta de la madera, mayor es el beneficio obtenido. De hecho, con los valores del tercer precio, apenas hay beneficios positivos, exclusivamente, con tasas de retorno 2 y densidad de 750 pies/ha. También se puede observar que, en la mayoría de las ocasiones, un aumento de G aumenta el beneficio obtenido y que, en la mayoría de las ocasiones, un aumento de HO aumenta el beneficio obtenido, o que un aumento de N disminuye el beneficio obtenido. Por lo que se ha de ser cauteloso con todo ello, ya que, de manera muy preliminar, se puede asumir que la fertilización en la plantación aumenta la producción, pero no se puede concluir que este aumento de producción amortice el gasto de esta operación, ya que esto dependerá de otros factores independientes, como el precio de la madera.

6. Conclusiones preliminares

Con este trabajo se puede concluir que realizar simulaciones a partir de los modelos dinámicos de crecimiento existentes, ayudan a tener una idea de la viabilidad económica de las operaciones y la gestión a realizar de una masa forestal.

De manera muy preliminar, se puede asumir que fertilizar en la plantación aumenta la productividad de masa de pino, sin embargo, no con ello garantizaremos la rentabilidad, ya que esto dependerá de otros factores económicos.

Otro punto importante para concluir es que se ha de tener en cuenta es que es muy difícil aislar el ensayo para el estudio del efecto de fertilización sin que otros factores, como los climáticos, afecten a este crecimiento.

7. Agradecimientos



Gracias a la empresa Financiera Maderera (FINSA), por permitir la instalación del ensayo en un terreno de su propiedad y por la colaboración en la plantación y en las mediciones de campo.

8. Bibliografía

ARIF ALI, M.; LOUCHE, J.; DUCHEMIN, M.; PLASSARD, C.; 2014. Positive growth response of *Pinus pinaster* seedlings in soils previously subjected to fertilization and irrigation, *Forest Ecology and Management*, 318:62-70

DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ROJO-ALBORECA, A.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; BARRIO-ANTA, M.; CRECENTE-CAMPO, F.; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, J.M.; PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; BALBOA-MURIAS, M.A.; GORGOSO-VARELA, J.J.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F.; 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. 268 pp + CD-Rom.

DOG, 2014. Orden de 19 de mayo de 2014 por la que se establecen los modelos silvícolas o de gestión forestal orientativos y referentes de buenas prácticas forestales para los distritos forestales de Galicia. *Diario Oficial de Galicia*, Núm. 106, 19/05/2014

DOG, 2021. Orden de 9 de febrero de 2021 por la que se modifica el anexo I de la Orden de 19 de mayo de 2014 por la que se establecen los modelos silvícolas o de gestión forestal orientativos y referentes de buenas prácticas forestales para los distritos forestales de Galicia. *Diario Oficial de Galicia*, Núm. 39, 9/02/2021

TRICHET, P.; BAKKER, M.R.; AUGUSTO, L.; ALAZARD, P.; MERZEAU, D.; SAUR, E.; 2009. Fifty Years of Fertilization Experiments on *Pinus pinaster* in Southwest France: The Importance of Phosphorus as a Fertilizer, *Forest Science* 55 (5): 390–402.

PUKKALA, T.; 2017. Optimal nitrogen fertilization of boreal conifer forest. *Forest Ecosystems*, 4:3. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0090-2>

SMETHURST, P. J.; 2010. Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture. *Plant and Soil* 335: 83-100. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0316-3>

VARELIDES, C.; T. KRITIKOS, T.; 1995. Effect of site preparation intensity and fertilization on *Pinus pinaster* survival and height growth on three sites in northern Greece, *Forest Ecology and Management*, 73(1–3):111-115

ZAS, E.; SAMPEDRO, L.; PRADA, E.; LOMBARDERO, M.J.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; 2006. Fertilization increases *Hylobius abietis* L. damage in *Pinus pinaster* Ait. seedlings, *Forest Ecology and Management*. 222(1):137-144