



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1268

Organiza





Influencia del suelo en el proceso de decaimiento de masas de *Pinus pinea* L. del centro de España.

SISAY, G. (1,2)*, MARTÍNEZ MORENO, J. (3), PÉREZ MARTÍN, E. (1), MORENO PÉREZ, D. (1), ORTIZ SANZ, M. (1), LAFUENTE ALVAREZ, F. (1), RUANO BENITO, I. (3), TURRIÓN NIEVES, M.B. (4), PARDOS MINGUEZ, M. (5), CALAMA SAINZ, R. (5), ROMERALO TAPIA, C. (5), PANDO FERNANDEZ, V. (6) y HERRERO DE AZA, C. (1).

(1) Departamento de Ciencias Agroforestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), ETSIIAA, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004.Palencia, ESPAÑA.

(2) Department of Geography and environmental studies, University of Gondar, P. O. Box 196, Gondar, Ethiopia.

(3) Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), ETSIIAA, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004. Palencia, ESPAÑA.

(4) Departamento de Ciencias Agroforestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), Unidad Asociada de I+D+i al CSIC (Gestión Forestal Sostenible), ETSIIAA, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004. Palencia, ESPAÑA.

(5) Departamento de Dinámica y Gestión Forestal, Instituto de Ciencias Forestales, INIA-CSIC, Carretera La Coruña km 7.5, 28040, Madrid.

(6) Departamento de Estadística e Investigación operativa. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), ETSIIAA, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004. Palencia, ESPAÑA.

*SISAY, G. y MARTÍNEZ MORENO, J., han contribuido de forma similar a la consecución del manuscrito

Resumen

Los suelos desempeñan un papel fundamental en la vitalidad de los ecosistemas forestales además de sustentar distintos servicios ecosistémicos. Este estudio investigó si las propiedades edáficas están relacionadas con el decaimiento



observado en las masas de *Pinus pinea* L. del centro de España. Para ello, se muestrearon suelos alrededor de 10 árboles sanos y 10 con síntomas de decaimiento (defoliación y/o decoloración de las acículas) en una masa irregular de pino piñonero. Se analizaron las siguientes propiedades químicas: porcentaje de limo, arena y arcilla, carbono y nitrógeno del suelo, fertilidad (fósforo disponible, contenidos cambiables de calcio, potasio y magnesio), conductividad eléctrica (CE), capacidad efectiva de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de materia orgánica y pH.

Los resultados mostraron que ninguna de las propiedades edáficas analizadas reveló diferencias significativas entre los árboles sanos y los sintomáticos. Los suelos presentaron características similares en ambos casos. Sin embargo, estos resultados abren nuevas líneas de investigación para explorar otros factores que puedan estar asociados al decaimiento de las masas de *Pinus pinea*, como la actividad microbiana, las interacciones biológicas en el suelo o las respuestas a las condiciones climáticas. Para estudios futuros, se considera necesario ampliar el muestreo a mayor escala y considerar variables adicionales del suelo para profundizar en el conocimiento sobre los procesos que afectan a la salud y sostenibilidad de estos ecosistemas forestales.

Palabras clave: Piñonero, propiedades fisicoquímicas edáficas, declive, patógenos.

1. Introducción

Pinus pinea es una especie cuya dinámica natural tiende a formar masas abiertas, de cierta irregularidad y habitualmente mezcladas con quercíneas (*Quercus ilex* L., *Quercus faginea* Lam., *Quercus suber* L.), enebros (*Juniperus communis* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Juniperus thurifera* L.), pino negral (*Pinus pinaster* Ait.) y diversas especies arbustivas. Sin embargo, la selvicultura aplicada durante el último siglo y medio se ha orientado hacia la formación de masas puras regulares o semirregulares, buscando una cobertura homogénea (CALAMA & MUTKE, 2022).

Según los escenarios de cambio climático, se prevé que los bosques mediterráneos se enfrenten a un incremento de las temperaturas junto con una mayor variabilidad estacional en las precipitaciones (IPCC, 2022). Así, el cambio climático constituye una de las principales amenazas actuales para el mantenimiento de la estructura y dinámica de los ecosistemas forestales, lo que podría alterar el suministro de servicios ecosistémicos claves (LINDNER et al., 2010). Esta vulnerabilidad, unida a una disminución general del vigor y una creciente mortalidad de los árboles (ALLEN et al., 2018; MCDOWELL et al., 2020), debe ser tenida en cuenta en la toma de decisiones en la gestión forestal.

El decaimiento de *Pinus pinea* y sus causas han sido investigados por varios autores en distintas regiones europeas, determinando que en él influyen factores climáticos y biológicos (PIRAINO & ROIG, 2020; CALAMA & MUTKE, 2022; NATALINI et al., 2024; NICCOLI et al., 2024). Ya en España, un informe del Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España (MITECO,



2011) mostró que el decaimiento de numerosos pies de *Pinus pinea* en 2009 fue vinculado al estrés hídrico ocasionado por sequías consecutivas en toda la península y en otro estudio más concreto (CALAMA et al., 2024) fue vinculado a episodios de sequía intensa, siendo muy notorios los síntomas en las cuencas del Tiétar y del Alberche.

El tipo de suelo y las propiedades fisicoquímicas que encontramos en las áreas forestales puede ser protagonista de la vulnerabilidad del ecosistema en general (CHERTOV et al., 2001; LANG et al., 2016). Investigaciones previas han descubierto que factores como la relación carbono/nitrógeno afectan al equilibrio entre los diferentes grupos de organismos del suelo, generando efectos en cascada sobre el resto de los organismos del ecosistema (BETANCUR-CORREDOR et al., 2023). Así, otros estudios han mostrado que los suelos con síntomas de patogenicidad suelen tener mayor contenido de carbono y materia orgánica, probablemente debido a la degradación de materia orgánica o a la acción de enzimas producidas por microorganismos del suelo (BYERS et al., 2020). Además, la alteración en los ciclos de nitrógeno y carbono tras la muerte de los árboles puede generar efectos secundarios en el suelo circundante (BYERS et al., 2020).

Por otra parte, MILLER & ROSEN (2005) mostraron que niveles altos de nutrientes promueven el crecimiento de patógenos al reducir la competencia por los recursos entre los organismos del suelo. En contraste, la limitación de ciertos nutrientes puede aumentar la susceptibilidad de las especies a estos patógenos (GHORBANI et al., 2008). Así, las características edáficas de un área forestal determinan la capacidad del suelo para retener nutrientes y mantener la fertilidad, lo que es trascendental para la vitalidad de los árboles y para la salud del ecosistema en general. Propiedades como la textura del suelo influyen en su capacidad de retención hídrica (GEROY et al., 2011), un factor crítico para la supervivencia de los árboles durante los períodos de sequía, frecuentes en climas mediterráneos (PAUSAS & FERNÁNDEZ MUÑOZ, 2012).

A través de la rizosfera, las plantas y los microorganismos asociados promueven la liberación de nutrientes de la materia orgánica del suelo (mineralización) (MARSCHNER, 1995), la conversión de residuos vegetales en materia orgánica estable del suelo (humificación) (CARVALHO et al., 2023) y la formación de agregados estables del suelo (TONG et al., 2020).

El nitrógeno, fósforo, potasio y hierro están estrechamente ligados al ciclo del carbono y son elementos muy importantes para el crecimiento de los árboles (FALKOWSKI et al., 2000). La deficiencia de estos nutrientes se ha relacionado con menor productividad y mayor mortalidad forestal (CUNHA et al., 2022). Estudios previos han demostrado que el suelo influye más en la composición microbiana que factores como la temperatura o la altitud (XUE et al., 2018). Sin embargo, sigue habiendo un vacío en nuestra comprensión de cómo estos factores interactúan para influir en la mortalidad y la salud de los bosques, específicamente en las regiones mediterráneas.



El objetivo de este estudio es profundizar en los factores edafológicos y su posible relación con el decaimiento de *Pinus pinea* en la zona, dado que las causas exactas del declive no han sido afirmadas de manera categórica. Este estudio analiza la relación entre distintas propiedades del suelo y la salud forestal con el objetivo de entender cómo las características edáficas afectan el estado de los árboles y el decaimiento en masas de *Pinus pinea*. Los resultados buscan contribuir al desarrollo de prácticas de gestión forestal más resilientes frente al cambio climático.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es determinar si las propiedades fisicoquímicas del suelo difieren entre árboles sanos y sintomáticos en zonas con decaimiento de *Pinus pinea* en el centro peninsular.

3. Metodología

Zona de estudio

El muestreo se llevó a cabo en pinares de *Pinus pinea* localizados en la Región de Procedencia “Valles del Tiétar y el Alberche”. En esta región el pino piñonero es la especie dominante en más de 30.000 ha, formando masas abiertas, envejecidas, con cierta tendencia a la irregularidad y tradicionalmente orientadas a la producción de piña. En este territorio, desde hace más de 15 años, se vienen registrando fenómenos de decaimiento y mortalidad en la especie (CALAMA & MUTKE, 2022), no habiéndose identificado aún el posible agente causante.

Muestreo realizado

Los muestreos se realizaron en el MUP 54 “Nahoncil, Las Cabreras y Agregados”, situado en el término municipal de San Martín de Valdeiglesias, Madrid. Se recogieron muestras de suelo alrededor de árboles adultos de *Pinus pinea* en varias localizaciones dentro del término municipal en abril de 2024. En cada punto de muestreo se seleccionaron dos árboles de dimensiones similares, un árbol sano y otro árbol con signos visibles de decaimiento en función de la defoliación y/o decoloración de acículas (*Figura 1*). Se recolectaron muestras de tierra de los 10 cm superiores de la superficie en cuatro puntos alrededor del tronco y se mezclaron y homogeneizaron consiguiendo una única muestra por árbol. En el momento del muestreo se anotaron el diámetro y la altura de cada árbol. Los suelos se transportaron en una nevera hasta el laboratorio donde se mantuvieron a temperatura constante (4°C) hasta su envío (unos días más tarde) para su análisis.



Figura 1: Monte de Pinus pinea en San Martín de Valdeiglesias. A la izquierda de la imagen se observa un Pinus pinea sano, a la derecha un Pinus pinea sintomático.

Análisis de las propiedades fisicoquímicas

Se analizaron diversas propiedades físicoquímicas del suelo, después de determinar el porcentaje de elementos gruesos (EG), incluyendo textura, pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo asimilable (P) concentraciones de cationes intercambiables (calcio-Ca-, magnesio -Mg-, potasio -K-, sodio -Na-), materia orgánica (MO) total, carbono total (C total), nitrógeno total (N total) y la relación C/N.

La textura (% de arena, limo y arcilla) fue determinada mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (MAPA, 1994), el pH medido con un pH-metro en una relación suelo: solución de 1:2,5. La CE fue determinada por conductímetro (1:5), CIC fue analizada por el método de Bascomb (BASCOMB, 1964), los cationes intercambiables fueron extraídos con cloruro de bario (BaCl_2) 0,1 M, el Ca y el Mg se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica, y el K y el Na mediante espectrofotometría de emisión (MAPA, 1994). El P asimilable por el método Olsen. La MO del suelo fue analizada por el método de Walkey y Black, el C total se determinó multiplicando la concentración de C fácilmente oxidable por un factor de 1,3 (MAPA, 1994), el N total fue analizado mediante el método Kjeldahl (JONES, 1991), y la relación C/N fue calculada como la proporción entre el C y N totales del suelo.



Análisis estadístico

Se ajustó un modelo lineal mixto (LMM, *ecuación 1*) siendo las variables dependientes las propiedades físicoquímicas del suelo, y las independientes el lugar de muestreo y el estado sanitario del árbol (CALAMA et al., 2021). El estado sanitario del árbol presentaba dos niveles (sano y sintomático) y el lugar de muestreo, el suelo debajo de cada árbol analizado, se consideró un factor aleatorio (con diez niveles).

La formulación del modelo fue la siguiente [*ecuación 1*]:

Ecuación 1:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde $i=1,2$ (1=árbol sintomático, 2=árbol sano) y $j=1\dots,10$ para los 10 lugares de muestreo.

Las variables y los parámetros del modelo fueron:

y_{ij} =valor observado para la propiedad física o química del árbol i en el sitio j .

μ =media global de la propiedad física o química.

α_i =efecto principal del estado de salud i .

γ_j =efecto aleatorio del sitio j con $\gamma_j \sim N(0, \sigma^2)$, donde σ^2 es la varianza del factor aleatorio.

ε_{ij} =error aleatorio para la propiedad física o química del estado de salud i en el sitio j , con $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$, donde σ^2 es la varianza aleatoria de los errores para el estado de salud i

$Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = \{\omega_i = i'0i \text{ if } i=j\}$, donde ω es la covarianza entre el árbol en decaimiento y el árbol sano en todos los sitios o lugares de muestreo.

Cuando el estado de salud resultó ser significativo, las diferencias entre niveles se evaluaron mediante la prueba t. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el procedimiento Proc MIXED de SAS 9.4 (SAS INSTITUTE INC., 2024).

4. Resultados

La **Tabla 1** muestra las medidas descriptivas de las variables dendrométricas y de las propiedades físicoquímicas del suelo en árboles sanos y sintomáticos. Los resultados del análisis de efectos fijos (**Tabla 2**) confirmaron que ninguna de las propiedades edáficas evaluadas presentó diferencias estadísticamente significativas entre los árboles sanos y los sintomáticos.

Aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas, se observaron ciertas tendencias en las propiedades del suelo entre los árboles sanos y

sintomáticos. En cuanto a la textura, los suelos bajo árboles sanos presentaron un contenido ligeramente superior de arcilla en comparación con los árboles sintomáticos.

En lo que respecta a los nutrientes, los suelos asociados a árboles sanos tendieron a presentar mayores concentraciones de P, mientras que en los árboles sintomáticos se registraron valores más elevados de K y Mg. De manera similar, los suelos de árboles sintomáticos mostraron valores ligeramente superiores en contenido de materia orgánica aunque sin alcanzar diferencias significativas. En cuanto a los valores de N, aun sin diferencias, los valores de los árboles sintomáticos fueron ligeramente superiores respecto de los árboles sanos, y los valores de EG y CIC fueron ligeramente inferiores en los árboles sintomáticos vs. sanos.

5. Discusión

El objetivo de este estudio fue analizar la relación entre las propiedades del suelo y el decaimiento de *Pinus pinea* para conocer las características específicas del suelo en la vitalidad de los bosques. Sin embargo, los resultados de este trabajo revelaron que ninguna variable mostró diferencias significativas.

Tabla 1. Medidas descriptivas de los árboles sanos y sintomáticos en la zona de estudio.

Variables	Sanos				Sintomáticos			
	Media	Std. Dev.	Min	Max	Media	Std. Dev.	Min	Max
Altura árbol (m)	8.33	2.81	5.50	13.80	8.46	2.71	4.00	13.60
Diámetro árbol (cm)	38.82	15.04	21.00	57.60	39.03	9.24	22.30	51.20
pH	6.41	0.38	5.86	7.14	6.51	0.42	5.99	7.30
CE	0.03	0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	0.02	0.06
Arena	79.70	6.50	65.84	85.84	79.00	4.43	69.84	85.84
Limo	9.92	11.12	2.28	40.28	9.42	4.90	5.28	21.28
Arcilla	11.88	1.88	8.88	14.88	11.58	2.11	8.88	15.88
OMS	4.42	1.17	2.46	5.60	4.54	2.07	2.53	8.88
P	8.80	5.24	4.00	17.00	7.54	2.98	4.00	12.70
K	109.70	29.12	58.00	160.00	127.20	36.69	84.00	178.00
Ca	7.05	2.60	2.90	11.10	7.65	3.30	3.90	13.20
Mg	1.50	0.58	0.89	2.42	1.91	0.57	1.14	3.29

Nt	0.18	0.04	0.11	0.26	0.19	0.08	0.11	0.37
%EGruesos	20.90	15.93	5.34	51.93	18.17	12.58	1.72	42.68
C total	3.04	0.87	1.77	4.80	3.01	1.23	1.88	5.83
CIC	15.66	3.92	9.69	21.25	15.38	5.24	8.75	27.19

Nota: Ce es conductividad eléctrica, C total es carbono total, N total es nitrógeno total, EG es elementos gruesos.

Tabla 2. Análisis estadístico de propiedades edáficas entre árboles sanos y sintomáticos.

<i>Test de tipo 3 de efectos fijos</i>				
<i>Efecto</i>	<i>NumDF</i>	<i>DenDF</i>	<i>F-Valor</i>	<i>Pr > F</i>
pH	1	9	1.01	0.3406
Conductividad Eléctrica (CE)	1	9	0.50	0.4961
Arcilla	1	9	0.12	0.7417
Materia Orgánica	1	9	0.03	0.8776
Fósforo (P)	1	9	0.14	0.7215
Potasio (K)	1	9	2.39	0.1566
Calcio (Ca)	1	9	0.24	0.6326
Magnesio (Mg)	1	9	1.76	0.2179
Nitrógeno Total (Nt)	1	9	0.15	0.7094
Elementos Gruesos	1	9	0.39	0.5502
Carbono Orgánico (CO Total)	1	9	0.01	0.9401
CIC	1	9	0.02	0.8913
Diámetro	1	9		0.9687
Altura	1	9	0.01	0.9067

Nota: NumDF, DenDF son los Grados de libertad del numerador y denominador, respectivamente; F-Valor es el Valor F estadístico F; Pr>F Valor es el Pvalor asociado con el estadístico F anterior.

Nuestros resultados contrastan con estudios previos, que revelan que las



propiedades fisicoquímicas del suelo influyen directa o indirectamente en la vitalidad de los bosques a través de diversos mecanismos.

Nuestra hipótesis inicial era encontrar valores más altos de limo y arcilla en los suelos bajo árboles sanos, ya que estos componentes mejoran la estructura del suelo, aumentan la retención de agua, facilitan la disponibilidad de nutrientes y crean un entorno favorable para el desarrollo de las raíces y la absorción de nutrientes. Estas propiedades son esenciales para el crecimiento de los árboles y para la salud general del ecosistema forestal (DODD et al., 2002). Estudios previos en la zona han identificado un patrón de crecimiento diferente en respuesta a la disponibilidad de agua entre los pies sanos respecto a pies decaídos (CALAMA & MUTKE, 2022). Debido a que los sitios de muestreo son pareados y corresponden al mismo tipo de suelo, esperábamos valores de pH similares. Sin embargo, aunque esto se cumplió, podría haberse manifestado alguna diferencia en propiedades del suelo relacionadas, como el nivel de nutrientes (HÄRDLE et al., 2004).

La posible razón por la que no se han encontrado diferencias significativas podría ser la limitación del muestreo y la baja variabilidad natural en el suelo, que dificulta detectar patrones claros. Estudios previos han encontrado que ciertas propiedades del suelo, como el contenido de arcilla (BRAVO et al., 2011) y la CIC, pueden influir en la productividad de *Pinus pinea*. La CIC fomenta la retención de nutrientes del suelo, evitando la lixiviación, algo particularmente importante en suelos arenosos o de baja fertilidad (MATTILA & RAJALA, 2022).

Además, otros factores podrían estar desempeñando un rol más determinante en la salud de los árboles. Así, GONÇALVES et al. (2023) encontraron que el crecimiento de *Pinus pinea* en Portugal estaba más condicionado por la disponibilidad de agua que por la composición química del suelo. Por su parte, LOEWE-MUÑOZ et al. (2024) encontraron que el crecimiento de *Pinus pinea* en plantaciones jóvenes estaba favorecido por un bajo contenido de Na y una mayor disponibilidad de N, P y Mg.

En este estudio, no se encontraron diferencias significativas pero se identificaron algunas tendencias en la composición del suelo. Los suelos de árboles sanos presentaron niveles ligeramente superiores de P, mientras que los suelos de árboles sintomáticos mostraron mayores concentraciones de K y Mg. El P es un elemento clave en procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la regulación del agua en las plantas (SARDANS & PEÑUELAS, 2021; WANG et al., 2013). Los macronutrientes del suelo como el N también son vitales para el crecimiento de los árboles y la resistencia de los bosques. No obstante, concentraciones elevadas de N pueden tener un efecto negativo. SDPERLING et al. (2019) mostraron que las altas concentraciones de N tienen un grave impacto perjudicial en los almendros, reduciendo la evapotranspiración, impidiendo la capacidad de los árboles para asimilar el N de manera efectiva, disminuyendo la conductancia hidráulica de todo el árbol, afectando la capacidad de transporte de agua y reduciendo la fotosíntesis. De manera similar, WALLACE et al. (2007) mostraron un impacto negativo del exceso de N en la vitalidad de masas mixtas de distintas especies en EE.UU.



Nuestros resultados podrían indicar que la composición del suelo no es el único factor determinante en el decaimiento de *Pinus pinea* en la zona sino que la salud del ecosistema forestal esté determinada por la interacción de múltiples factores como las condiciones microclimáticas o la interacción con el microbioma edáfico. Estas limitaciones sugieren la necesidad de incorporar en futuros estudios otros factores para obtener una comprensión más integral del impacto del suelo en la salud forestal y abordar de manera más completa el objetivo planteado.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio no han permitido establecer una relación significativa entre las propiedades edáficas y el estado de decaimiento de las masas de *Pinus pinea* en la zona de estudio. A pesar de que se esperaban diferencias en variables como la textura del suelo, los nutrientes y el pH, los datos obtenidos no mostraron variaciones significativas entre los suelos debajo de árboles sanos y aquellos debajo de árboles con síntomas de decaimiento. Este resultado nos puede estar indicando que existen otros factores más complejos o específicos que influyen en el decaimiento de *Pinus pinea*.

Es importante destacar que el tamaño reducido de la muestra, la limitada extensión de la zona de estudio y la homogeneidad de las condiciones edáficas podrían haber influido en la falta de hallazgos significativos. Un mayor número de muestras y la expansión de la zona de estudio, abarcando diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, podrían haber permitido obtener resultados más representativos y concluyentes.

Para futuras investigaciones, es necesario abordar el decaimiento de *Pinus pinea* desde una perspectiva multidimensional, considerando de manera integrada factores edáficos, hídricos, biológicos y climáticos.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del proyecto BEGINPINE, El final es el comienzo. Envejecimiento y regeneración de pinares autóctonos: resiliencia y vulnerabilidad frente a un ambiente en cambio, PID2022-136906OB-C21, financiado por el Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023 y por el programa Erasmus + KA171.

8. Bibliografía

ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D.; MCDOWELL, N. G.; 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), 1–55. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>



BASCOMB, C. L.; 1964. Rapid method for the determination of cation-exchange capacity of calcareous and non-calcareous soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 15 (12), 821-823. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740151201>

BETANCUR-CORREDOR, B.; LANG, B.; RUSSELL, D. J.; 2023. Organic nitrogen fertilization benefits selected soil fauna in global agroecosystems. *Biology and Fertility of Soils*, 59(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00374-022-01677-2>

BRAVO, F., LUCÁ, M., MERCURIO, R., SIDARI, M., & MUSCOLO, A. (2011). Soil and forest productivity: a case study from Stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Calabria (southern Italy). *Iforest-Biogeosciences and Forestry*, 4(1), 25. <https://doi.org/10.3832/ifor0559-004>

BYERS, A. K.; CONDRON, L.; O'CALLAGHAN, M.; WAIPARA, N.; & BLACK, A.; 2020. Soil microbial community restructuring and functional changes in ancient kauri (*Agathis australis*) forests impacted by the invasive pathogen *Phytophthora agathidicida*. *Soil Biology and Biochemistry*, 150, 108016. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108016>

CALAMA, R.; GARCÍA, M.; BRAVO, S.; MADRIGAL, G.; ROMERALO, C.; HERRERO, C.; PARDOS, M. 2024, Decaimiento y mortalidad de *Pinus pinea* en la región “Valles del Tiétar y el Alberche”: cuantificación, factores de influencia y nuevas líneas de investigación. V reunión GT Sanidad Forestal SECF. Albacete, junio 2024. Poster.

CALAMA, R., DE-DIOS-GARCÍA, J., DEL RÍO, M., MADRIGAL, G., GORDO, J., & PARDOS, M. (2021). Mixture mitigates the effect of climate change on the provision of relevant ecosystem services in managed *Pinus pinea* L. forests. *Forest Ecology and Management*, 481, 118782. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118782>

CALAMA, R., & MUTKE, S. 2022. Fichas de impactos, vulnerabilidad y oportunidades de adaptación al cambio climático para ecosistemas arbolados: Pinares de *Pinus pinea*. En: BRAVO, F. (coord) 2022. Adaptación al cambio climático: directrices para la adaptación de la gestión del patrimonio natural y la política forestal al cambio climático en Castilla y León. Ed. Universidad de Valladolid, 507 pp.

CARVALHO, M. L., FERREIRA MACIEL, V., DE OLIVEIRA BORDONAL, R., LUÍS, J., CARVALHO, N., FERREIRA, T. O., PELLEGRINO CERRI, C. E., & CHERUBIN, M. R. (2023). *Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools—a literature review* *Division-Soil Use and Management | Commission-Soil and Water Management and Conservation*. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230130>

CHERTOV, O. G.; KOMAROV, A. S.; NADPOROZHSKAYA, M.; BYKHOVETS, S. S.; &



ZUDIN, S. L.; 2001.ROMUL - A model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling.Ecological Modelling, 138(1–3), 289–308.[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00409-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00409-9)

CUNHA, H. F. V.; ANDERSEN, K. M.; LUGLI, L. F.; SANTANA, F. D.; ALEIXO, I. F.; MORAES, A. M.; GARCIA, S.; DI PONZIO, R.; MENDOZA, E. O.; BRUM, B.; ROSA, J. S.; CORDEIRO, A. L.; PORTELA, B. T. T.; RIBEIRO, G.; COELHO, S. D.; DE SOUZA, S. T.; SILVA, L. S.; ANTONIETO, F.; PIRES, M.; ...QUESADA, C. A.; 2022. Direct evidence for phosphorus limitation on Amazon forest productivity. *Nature*, 608(7923), 558–562.<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05085-2>

DODD, M. B.; LAUENROTH, W. K.; BURKE, I. C.; & CHAPMAN, P. L.; 2002. Associations between vegetation patterns and soil texture in the shortgrass steppe. *Plant Ecology*, 158(2), 127–137.<https://doi.org/10.1023/A:1015525303754>

FALKOWSKI, P., SCHOLES, R. J., BOYLE, E. E. A., CANADELL, J., CANFIELD, D., ELSER, J., ... & STEFFEN, W. (2000). The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *science*, 290(5490), 291-296. DOI: 10.1126/science.290.5490.291

GEROY, I. J.; GRIBB, M. M.; MARSHALL, H. P.; CHANDLER, D. G.; BENNER, S. G.; & MCNAMARA, J. P.; 2011. Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrological Processes*, 25(25), 3836–3842.<https://doi.org/10.1002/hyp.8281>

GHORBANI, R.; WILCOCKSON, S.; KOOCHEKI, A.; & LEIFERT, C.; 2008. Soil management for sustainable crop disease control: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 6(3), 149–162.<https://doi.org/10.1007/s10311-008-0147-0>

GONÇALVES, A. C., ALEXANDRE, C., ANDRADE, J., & PIRES, R. (2023). Effects of chemical soil characteristics, air temperature and precipitation on *Pinus pinea* Growth in Southern Inland Portugal. *Forests*, 14(11), 2160.<https://doi.org/10.3390/f14112160>

HÄRDTLE, W.; OHEIMB, G. VON; FRIEDEL, A.; MEYER, H.; & WESTPHAL, C.; 2004. Relationship between pH-values and nutrient availability in forest soils – the consequences for the use of ecograms in forest ecology.142, 134–142.<https://doi.org/10.1078/0367-2530-00142>

IPCC. (2022). *Cambio climático 2022: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del IPCC* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, et al., Eds.).Cambridge University Press.https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf

JONES, J. J. (1991). *Kjeldahl method for nitrogen determination* (pp. 79-pp).



LANG, F.; BAUHUS, J.; FROSSARD, E.; GEORGE, E.; KAISER, K.; KAUPENJOHANN, M.; KRÜGER, J.; MATZNER, E.; POLLE, A.; PRIETZEL, J.; RENNENBERG, H.; & WELLBROCK, N.; 2016. Phosphorus in forest ecosystems: New insights from an ecosystem nutrition perspective. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179(2), 129–135.<https://doi.org/10.1002/jpln.201500541>

LINDNER, M.; MAROSCHEK, M.; NETHERER, S.; KREMER, A.; BARBATI, A.; GARCIA-GONZALO, J.; ... & MARCHETTI, M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698-709.<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>

LOEWE-MUÑOZ, V., BONOMELLI, C., DEL RÍO, R., DELARD, C., & BALZARINI, M. (2024). Effects of climate and soil properties on growth of *Pinus pinea* young plantations. *Plant and Soil*, 505(1), 351-362.<https://doi.org/10.1007/s11104-024-06682-y>

MAPA, 1994. Métodos oficiales de análisis de suelos y aguas para riegos. Tomo III. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

MARSCHNER, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants.<https://doi.org/10.1016/C2009-0-02402-7>

MATTILA, T. J.; & RAJALA, J.; 2022. Estimating cation exchange capacity from agronomic soil tests: Comparing Mehlich-3 and ammonium acetate sum of cations. *Soil Science Society of America Journal*, 86(1), 47–50.<https://doi.org/10.1002/saj2.20340>

MCDOWELL, N. G.; ALLEN, C. D.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.; AUKEMA, B. H.; BOND-LAMBERTY, B.; CHINI, L.; CLARK, J. S.; DIETZE, M.; GROSSIORD, C.; HANBURY-BROWN, A.; HURTT, G. C.; JACKSON, R. B.; JOHNSON, D. J.; KUEPPERS, L.; LICHTSTEIN, J. W.; OGLE, K.; POULTER, B.; PUGH, T. A. M.; SEIDL, R.; ... XU, C.; 2020. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 368(6494).<https://doi.org/10.1126/science.aaz9463>

MILLER, J. S.; & ROSEN, C. J.; 2005. Interactive effects of fungicide programs and nitrogen management on potato yield and quality. *American Journal of Potato Research*, 82(5), 399–409.<https://doi.org/10.1007/BF02871970>

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. (MITECO). (2011). *Módulo 09: Resultados Comunidad de Madrid*. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/modulo_09_resultados_comunidad_de_madrid_tcm30-



163266.pdf

NATALINI, F., ALEJANO, R., PARDOS, M., CALAMA, R., & VÁZQUEZ-PIQUÉ, J. (2024). Declining trends in long-term *Pinus pinea* L. growth forecasts in Southwestern Spain. *Dendrochronologia*, 88, 126252. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126252>

NICCOLI, F., KABALA, J. P., ALTIERI, S., FAUGNO, S., & BATTIPAGLIA, G. (2024). Impact of *Toumeyella parvicornis* outbreak in *Pinus pinea* L. forest of Southern Italy: First detection using a dendrochronological, isotopic and remote sensing analysis. *Forest Ecology and Management*, 566, 122086. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122086>

PAUSAS, J. G.; & FERNÁNDEZ-MUÑOZ, S.; 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: From fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change*, 110(1–2), 215–226. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0060-6>

PIRAINO, S., & ROIG, F. A. (2020). Spring-summer drought induces extremely low radial growth reactions in North-Tyrrhenian *Pinus pinea* L. *Floresta e Ambiente*, 27, e20180303. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.030318>

SARDANS, J.; & PEÑUELAS, J.; 2021. Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. In *Plants* (Vol. 10, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/plants10020419>

SAS Institute Inc. 2024 SAS/Statm User's Guide, Release 9.4; Sas Institute Inc.: Cary, NC, USA.

TONG, L., ZHU, L., LV, Y., ZHU, K., LIU, X., & ZHAO, R. (2020). Response of organic carbon fractions and microbial community composition of soil aggregates to long-term fertilizations in an intensive greenhouse system. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 641-652. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02436-x>

WALLACE, Z. P.; LOVETT, G. M.; HART, J. E.; & MACHONA, B.; 2007. Effects of nitrogen saturation on tree growth and death in a mixed-oak forest. *Forest Ecology and Management*, 243(2–3), 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.015>

WANG, M.; ZHENG, Q.; SHEN, Q.; & GUO, S.; 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7370–7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>

XUE, P. P.; CARRILLO, Y.; PINO, V.; MINASNY, B.; & MCBRATNEY, A. B.; 2018. Soil



Properties Drive Microbial Community Structure in a Large Scale Transect in South eastern Australia. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30005-8>