



9CFE-1968



Efectos de los clareos tempranos sobre las propiedades microbiológicas y enzimáticas del suelo en regenerados post-incendio de *Pinus halepensis* Mill.

ANDRES-ABELLÁN M. (1,2), PICAZO-CÓRDOBA M.I. (1,2), TÉLLEZ SÁNCHEZ J.J. (1,2), LOPEZ-SERRANO F.R. (1,2), RUBIO E. (2,3), WIC C. (2), ARQUERO ESCARUEÑA R. (1,2), CHEBBI W. (1,2), GARCIA-MOROTE F.A. (1,2)

(1) ETSIAMB, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Montes y Biotecnología. Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete 02006

(2) IER, Instituto de Investigación en Energías Renovables. Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete 02006

(3) ETSIIA, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete 02006

Resumen

Se presentan los resultados de un estudio sobre el efecto de los clareos en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y enzimáticas del suelo, en regenerados post-incendio de *Pinus halepensis* Mill, en ambiente mediterráneo semiárido (Sierra de los Donceles, Hellín, Albacete).

El diseño experimental, se inició en marzo de 2023 y se replantearon 8 parcelas en un total de 1 ha, en las que se estudia el efecto en la evolución del suelo según tres factores: i) Exposición: solana (4 parcelas) y umbría (4 parcelas); ii) Tratamiento: clareo, con desbroce (2 parcelas de las 4) y control, sin tratamiento (2 parcelas de las 4); iii) Tiempo transcurrido desde el tratamiento, Recogida (1, 1º recogida 2023 y 2, 2º recogida 2024).

Se tomaron dos muestras en las diagonales de cada parcela, compuesta cada una de 3 submuestras con 6 picadas, para alcanzar la mayor representatividad. En laboratorio son analizados los siguientes parámetros: humedad (H, %), pH, conductividad eléctrica (CE, $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$), densidad aparente (da : $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), carbono total (CT, %), nitrógeno Kjeldahl (Nk, %), fósforo (P, ppm), carbono de la biomasa (CB, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ de suelo), respiración basal (RB, $\text{mg C-CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$) y enzima deshidrogenasa (ADH, $\mu\text{mol (INTF)} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). Se calcularon los índices simples combinados cociente metabólico (qCO_2 , $\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{CB} \cdot \text{dia}^{-1}$) y coeficiente de mineralización (qm , $\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{CT} \cdot \text{dia}^{-1}$).

Tras un año de estudio, los factores exposición, tratamiento, fecha de recogida y sus interacciones muestran efectos significativos en las variables fisicoquímicas, pH, CE, CT, Nk, y P; en las variables microbiológicas y enzimáticas RB, CB y ADH; así como en el índice combinado simple, cociente metabólico qCO_2 . Los resultados muestran que el tratamiento de clareo influye en la recuperación del suelo post-incendio evolucionando a suelos menos estresados.



Palabras clave

Ambiente mediterráneo semiárido, pino carrasco, deshidrogenasa, respiración basal, índices combinados, recuperación de suelo.

1. Introducción

El fuego es una cualidad natural más del ámbito mediterráneo. Es una perturbación capaz de transformar el paisaje y sus características, tanto biológicas como fisicoquímicas. Los seres humanos han modificado los regímenes de incendios a lo largo de la historia, pero las últimas décadas se han marcado por rápidas alteraciones en los regímenes de incendios como resultado de cambios importantes en la población humana, sobre todo respecto al crecimiento, los factores socioeconómicos, la gestión de la tierra y el cambio de usos de suelo (PAUSAS Y KEELEY, 2009; MATAIX-SOLERA, 2009). Si se tiene en cuenta el cambio climático se puede prever un aumento aun mayor en la frecuencia de los incendios y en la época en la que aparecen (SALGADO, 2023), por lo que es importante considerar “la ecología del fuego” en la gestión del entorno abordando objetivos específicos como la reducción de la peligrosidad, el mantenimiento o mejora de los servicios ecosistémicos y la resiliencia de los ecosistemas al fuego (MORENO RODRÍGUEZ ET AL, 2015).

La estructura y el funcionamiento de los ecosistemas de la superficie están sostenidos por una gran variedad de procesos y organismos subterráneos. A su vez una de las perturbaciones más comunes, pero potencialmente devastadoras, en la dinámica de los ecosistemas es el fuego, tanto natural como antropogénico (NEARY ET AL, 1999). Si la severidad del incendio es baja no produce cambios irreversibles en el suelo, pero si la severidad es alta puede producir el deterioro tanto de la estructura como de la porosidad, pérdida considerable de nutrientes por volatilización y una marcada alteración tanto de la cantidad como de la composición específica de las comunidades microbianas y de invertebrados que habitan en el suelo (CERTINI, 2005), así como de su actividad enzimática y microbiológica (MARTÍNEZ-GARCÍA ET AL, 2018).

En esta línea, estudios más recientes ponen de manifiesto el efecto del tratamiento post-incendio en la calidad del suelo con aportes de restos vegetales (astillas, ramas y troncos), en distintas exposiciones y pendientes, y en distinto periodo (evolución temporal durante al menos 2 años) (ANDRES-ABELLAN ET AL, 2023). En concordancia, resultados similares se han obtenido en otros trabajos que utilizan mulching de paja para favorecer la funcionalidad microbiana del suelo después de un incendio (FONTAINE, 2007) (Lliteras et al., 2016); también (MOLINA, 2019) refleja la recuperación de las actividades enzimáticas y cambios en el coeficiente metabólico y la respiración basal del suelo relacionados con otras técnicas de



tratamiento post-incendio, como la utilización de diques (ANDRÉS-ABELLÁN ET AL, 2023).

Este trabajo estudia las claras tempranas como técnicas de regeneración post-incendio y sus efectos sobre la recuperación del suelo.

2. Objetivos

Analizar los efectos que tienen los clareos como tratamiento forestal sobre la actividad microbiológica y enzimática del suelo en regenerados post-incendio de *Pinus halepensis* Mill. en ambientes mediterráneos semiáridos.

3. Metodología

El área de estudio se encuentra en la cuenca del río Segura, en la Sierra de los Donceles, dentro del término municipal de Hellín, Albacete (Figura 1). En ella se localizan los bosques de *Pinus halepensis* Mill. más representativos del ambiente semiárido de Castilla-La Mancha, afectados por el gran incendio ocurrido en julio de 2012. Desde un punto de vista geológico, el área pertenece a las cordilleras Prebéticas (CATAÑO, 1997). Según la clasificación de la FAO, los suelos predominantes son Xerosoles cálcicos. Atendiendo a los datos del Instituto Geológico Nacional (IGN, 2025) se trata de suelos clasificados como Aridisol Cambid Haplocambid Haplargid caracterizados por su bajo contenido de materia orgánica, textura franco-arcillosa y un pH aproximado de 8.

Climáticamente, el área forma parte del único sector semiárido de Castilla-La Mancha, con precipitaciones medias anuales inferiores a 350 mm. En la estación del Embalse del Talave (Longitud: 1°49' W, Latitud: 38°30' N, Altitud: 550 m), situada a unos 6 km del origen del incendio y con un registro climático de 37 años, la precipitación media anual es de 301,6 mm, notablemente inferior a la de otros climas mediterráneos de la provincia. El índice de humedad registrado es de -39,60 (semiárido) y la eficacia térmica alcanza un valor de 88,7 (mesotérmico). Bioclimáticamente, la zona de estudio pertenece a la provincia Mediterránea, dentro de la región Murciano-Almeriense, sector Murciano y se clasifica en el piso Mesomediterráneo Inferior (AEMET, 2009). La vegetación potencial está representada por la serie Mesomediterránea semiárida de la coscoja (*Rhamno lycioidis-Quercetum cocciferae* S. (RIVAS MARTÍNEZ, 1987).

En la actualidad, la vegetación dominante consiste en pinares de carrasco (*Pinus*



halepensis Mill.), mientras que los coscojares (*Quercus coccifera*) se encuentran principalmente en áreas concretas, especialmente en umbrías debido a su mayor humedad. En las solanas, tanto la extensión como la diversidad de pinares y coscojares están notablemente reducidas. En los claros del monte se desarrollan otras especies de matorral, como la atocha (*Stipa tenacissima*) y la albaida (*Anthyllis cytisoides*) (BOTANICO, 2001).

En el área de estudio (Figura 1) se establecieron un total de 8 parcelas, abarcando una superficie aproximada de 1 hectárea. Estas parcelas se clasificaron según su orientación, 4 ubicadas en solana y 4 en umbría. Adicionalmente, en 2 parcelas de cada orientación se realizó un clareo, diferenciándolas en dos categorías: las parcelas intervenidas, denominadas clareo y aquellas sin intervención, designadas como control. En las parcelas clareo se redujo la densidad hasta dejar 8 individuos por parcela a una distancia de 1m, dejando una densidad de 2000 pie/ha de masa joven de regenerado post-incendio. Además, se realizó el desbroce del matorral de la zona.

En cada parcela se recogieron 2 muestras de suelo de los primeros 15-20 cm, en las diagonales principales. Cada muestra está compuesta de 3 submuestras, con 6 picadas cada una, de manera que fuera representativo para la parcela.

En el laboratorio, se analizaron los siguientes parámetros: H, humedad (%) (UNE-EN:11461:2014, 2014); pH (UNE-EN:13037, 2012); CE, conductividad eléctrica ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) (UNE-EN:77308, 2001); da, densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (UNE-EN:103301, 1994); CT, carbono total (%) (WALKEY Y BLACK, 1934); Nk, nitrógeno Kjeldahl (%) (BREMMER, 1965); P, fósforo (ppm) (OLSEN, 1983); CB, carbono de la biomasa ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ de suelo) utilizando el método de fumigación-extracción propuesto por Vance et al, 1987 y modificado por (GARCIA, 2003); RB, respiración basal ($\text{mg C-CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$) (ANDERSON, 1982) y ADH, actividad de la enzima deshidrogenasa ($\mu\text{mol (INTF)} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) (GARCIA, 2003).

También se determinaron índices simples de parámetros combinados, cociente metabólico (CB/RB) [qCO_2 ($\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{CB} \cdot \text{dia}^{-1}$)] y coeficiente de mineralización (CT/RB) [qm ($\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{CT} \cdot \text{dia}^{-1}$)].

.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante: i) análisis de varianza (ANOVA) considerando como variables dependientes los parámetros determinados en laboratorio (H, pH, CE, da, CT, N, P, CB, RB, ADH) y como factores: E, exposición, T, tratamiento y R, fecha de recogida (evolución en el tiempo) y ii) modelos lineales generales (MLG), para la descripción de parámetros y observación de las posibles interacciones entre factores para cada uno de los parámetros, comprobando los residuos con el estadístico de Durbin-Watson (DW)

En ambos análisis se aplicó el método de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD) con un intervalo de confianza del 95% y un nivel de significancia de

$P < 0,05$ en los casos donde se obtuvo un valor de F significativo. Para los análisis estadísticos se utilizó el software Statgraphics versión 19.6.04.

4. **Resultados** En la Tabla 1, se muestra el efecto de los factores E, exposición (solana y umbría); T, tratamiento (control y clareo) y R, recogida o tiempo transcurrido entre los muestreos del suelo (1, 1º recogida, 2023 y 2, 2º recogida, 2024) sobre los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, enzimáticos e índices simples combinados de los suelos de la zona de estudio, así como el nivel de significación asociado. En la Tabla 2, se recogen las interacciones de cada variable entre los factores del análisis del modelo lineal general (MLG). La exposición afecta de forma significativa a la mayoría de los parámetros fisicoquímicos. El pH (8,66) y el fósforo (P:38) presentan sus mayores valores en solana y control, mientras que la conductividad eléctrica (CE:16,8) y la densidad aparente (da:1,69) los presenta en solana y clareo. Por el contrario, el carbono total (CT) y el nitrógeno Kjeldahl (NK) son más altos en umbría y control (CT:3,78; NK:0,10) (Figura 2). El resto de parámetros que no se ven afectados significativamente por la exposición, como la humedad (H:15,8); el carbono de biomasa (CB:370) y el coeficiente de mineralización (qm:0,18), muestran una tendencia creciente en umbría. Sin embargo, la respiración basal (RB:26) y el cociente metabólico (qCO_2 :18) son ligeramente más altos en solana. El tratamiento solo afecta de manera significativa al fósforo y a la conductividad eléctrica. Los valores más altos de fósforo (P:37,4) se registran en las zonas control mientras que en las zonas con clareo la conductividad eléctrica (CE:16,9) es mayor que en las zonas control (Figura 3). La actividad enzimática de la deshidrogenasa (ADH), aunque no muestra cambios estadísticamente significativos con el tratamiento, es también ligeramente más alta en las zonas control. El factor recogida del suelo o tiempo transcurrido desde el tratamiento, afecta de forma significativa a todos los parámetros estudiados. Al segundo año del tratamiento se observa aumento de los parámetros carbono de biomasa (CB: 590), de los índices simples, cociente metabólico (qCO_2 :31) y coeficiente de mineralización (qm:0,18). Por el contrario, disminuyen los parámetros conductividad eléctrica (CE:12,1), fósforo (P:30,1) y actividad deshidrogenasa (ADH:0,020) (Tabla 2) (Figura 4). Respecto a la interacción entre exposición y tratamiento solo se observan diferencias significativas en los parámetros conductividad eléctrica (CE), carbono total (CT) y nitrógeno Kjeldahl (Nk) (Figura 5). En la Figura 6, donde se muestra la interacción entre el tratamiento y el tiempo transcurrido (recogida, R), los parámetros microbiológicos y enzimáticos siguen una tendencia clara en su evolución. La respiración basal (RB) y la actividad enzimática deshidrogenasa (ADH) disminuyen y se incrementa el carbono de la biomasa (CB). En relación con los índices simples combinados, tanto el cociente metabólico (qCO_2) como el coeficiente de mineralización (qm) presentan la misma tendencia que el carbono de la biomasa (CB) (Figura 7).

5. **Discusión**



El análisis de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos e índices simples combinados, en función de los factores exposición, tratamiento y momento de recogida del suelo proporciona información valiosa sobre la influencia de las condiciones ambientales y el manejo del suelo en sus propiedades.

El factor exposición (solana y umbría) influye en todos los parámetros fisicoquímicos. Los valores más altos de pH y de conductividad eléctrica (CE) en solana, pueden deberse a un posible efecto por mayor evapotranspiración, que concentra sales en la superficie del suelo, elevando el pH (XU ET AL, 2013). También en solana la densidad aparente (ρ_a) alcanza los valores más altos, lo que podría deberse a una mayor compactación en áreas más expuestas al sol, por menor cobertura vegetal y mayor acción mecánica superficial, como el impacto directo de la lluvia y la actividad animal (VEENSTRA Y BURRAS, 2015). La umbría, conlleva mayor humedad, lo que sugiere una mayor retención de agua en áreas menos expuestas al sol, coincidiendo con estudios que han identificado una correlación positiva entre la humedad del suelo y la cobertura vegetal o la exposición limitada al sol (GÓMEZ-PLAZA ET AL, 2001). Esta mayor humedad beneficia el incremento de carbono total (CT) y nitrógeno Kjeldahl (NK), lo que refleja la influencia de las condiciones microclimáticas, favoreciendo la acumulación de materia orgánica y nutrientes, en línea con investigaciones sobre dinámica de carbono y nitrógeno en suelos con diferentes exposiciones (JOBBÁGY Y JACKSON, 2000; GARCÍA-RUIZ ET AL, 2013). Los parámetros microbiológicos, enzimáticos y los índices simples de parámetros combinados, no presentan diferencias significativas. Sin embargo, la umbría favorece el incremento del carbono de la biomasa (CB) y del coeficiente de mineralización (q_m), mientras que ayuda a la disminución en la respiración basal (RB) y en el cociente metabólico (q_{CO_2}), indicando una recuperación más equilibrada y sostenible del suelo en esta exposición (BASTIDA ET AL, 2008).

El efecto del factor tratamiento (clareo), es menor en comparación con la exposición y la recogida. Los valores más bajos de los parámetros en las zonas clareadas frente a las control, podrían deberse a una mayor erosión superficial o a una menor incorporación de materia orgánica tras la reducción de la cobertura vegetal (TURNER ET AL, 2003). Este es el caso de parámetros como la conductividad eléctrica (CE), el fósforo (P) y la actividad enzimática deshidrogenasa (ADH), lo que sugiere que el manejo del suelo a través del clareo puede alterar las propiedades de este, pero su efecto parece limitado en comparación con las variaciones espaciales y temporales. Una mayor conductividad eléctrica (CE) y menor contenido en fósforo (P) en clareo sugieren una redistribución de nutrientes y de sales tras la eliminación de parte de la cobertura vegetal, efecto común en prácticas de manejo forestal (NOVARA ET AL, 2013). Además, diversos estudios han señalado que los efectos del clareo, como manejo forestal, tienden a ser más evidentes a largo plazo o bajo condiciones específicas, donde los cambios en la dinámica de los nutrientes y en las propiedades edáficas pueden observarse con mayor claridad (FONTAINE ET AL, 2007; GÓMEZ-REY, 2012).

Los resultados destacan que el momento de la recogida (1ª recogida, 2023 y 2ª recogida, 2024) tiene un efecto significativo en la mayoría de los parámetros



estudiados, incrementándose significativamente el pH, el carbono de la biomasa (CB), el cociente metabólico (qCO_2) y el coeficiente de mineralización (q_m) y disminuyendo el fósforo (P), la conductividad eléctrica (CE), la respiración basal (RB) y la actividad enzimática deshidrogenasa (ADH). Estos cambios temporales están probablemente relacionados con variaciones en la actividad microbológica, tal como se ha señalado en estudios previos (LIANG ET AL, 2017; ZHANG ET AL, 2021). Además, esta tendencia podría estar relacionada con el proceso natural de recuperación de los suelos tras un incendio, donde los microorganismos desempeñan un papel clave en la regeneración de las funciones edáficas y la estabilización del ecosistema afectado (PEREIRA ET AL, 2014).

Finalmente, el tiempo transcurrido desde el tratamiento no es suficiente para obtener efectos significativos en las interacciones de los diferentes factores. Solo los parámetros fisicoquímicos fósforo, carbono total, nitrógeno Kjeldahl y conductividad eléctrica se ven afectados por algunas interacciones dobles, mientras que la triple interacción (recogida/tratamiento/exposición) afecta a la respiración basal y el cociente metabólico. Ello subraya la importancia del monitoreo temporal para comprender los procesos dinámicos del suelo y su evolución (LIU ET AL, 2012).

Estos hallazgos resaltan la necesidad de considerar tanto los factores espaciales como temporales en el análisis de suelos para una gestión eficiente y sostenible de los ecosistemas (SCHMIDT ET AL, 2011).

6. Conclusiones

En la condición de clima mediterráneo semiárido, la exposición (solana/umbría) influye significativamente en las propiedades fisicoquímicas del suelo, registrándose mayores valores de pH, fósforo, conductividad eléctrica y densidad aparente, en solana con mayor evapotranspiración y menor cobertura vegetal; mientras que la mayor humedad de las zonas de umbría favorece la acumulación de carbono total y nitrógeno Kjeldahl. Estos patrones reflejan la influencia de las condiciones microclimáticas, en los procesos de mineralización y retención de nutrientes.

El tratamiento silvícola mediante clareo muestra efectos más limitados sobre las variables analizadas en comparación con los factores espaciales y temporales. No obstante, se detectan reducciones en fósforo, conductividad eléctrica y actividad enzimática deshidrogenasa en zonas intervenidas, lo que sugiere impactos sobre la dinámica de nutrientes y la actividad microbiana, posiblemente asociados a una disminución en la cobertura vegetal.

El tiempo transcurrido desde la aplicación del tratamiento (recogida) representa el



factor más determinante, con efectos significativos sobre todos los parámetros analizados. En el segundo año se evidencia una recuperación funcional del suelo, reflejada en el aumento del carbono de biomasa y los índices microbiológicos (cociente metabólico y coeficiente de mineralización) y una reducción en fósforo, conductividad eléctrica, respiración basal y actividad deshidrogenasa. Lo que pone de manifiesto la influencia de procesos naturales de recuperación postincendio y destaca la importancia del seguimiento temporal.

La interacción entre tratamiento y exposición muestra diferencias significativas en los parámetros conductividad eléctrica, carbono total y nitrógeno Kjeldahl, lo que indica que el impacto del clareo sobre la dinámica de nutrientes del suelo está condicionado por la exposición del terreno. En particular, los efectos del clareo son más marcados en las solanas, donde la pérdida de cobertura vegetal y la mayor exposición pueden intensificar procesos de lixiviación y compactación.

La interacción entre tratamiento y tiempo transcurrido (recogida) revela una evolución significativa de los parámetros microbiológicos y enzimáticos. La disminución progresiva de la respiración basal y de la actividad deshidrogenasa, junto con el aumento del carbono de biomasa, sugiere una recuperación funcional del microbioma edáfico en las parcelas tratadas, posiblemente asociado a una reestructuración de las comunidades microbianas hacia un estado más eficiente y estable.

Las interacciones entre los factores exposición, tratamiento y recogida, muestran un alcance limitado, afectando de forma significativa solo a los parámetros respiración basal y cociente metabólico. Estos resultados refuerzan la necesidad de integrar un enfoque temporal en el estudio del suelo para comprender adecuadamente su evolución funcional y estructural.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación aportada por los siguientes proyectos de I+D+i: REPOSTFIRE, SBPLY/23/180225/000136, apoyado por la JCCM (cofinanciado por fondos FEDER, UE) y PID2020-119861RB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ y se ha desarrollado en el marco de los proyectos cofinanciados por la European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency dentro del European Life Program, [LIFE21-CCM-ES-LIFE TOKEN CO₂/101074388]. Se ha llevado a cabo en el marco de la Unidad Asociada formada por dos equipos de investigación: MARFO (UCLM) y GRENZ (CEBAS-CSIC).

8. Bibliografía

ANDRÉS-ABELLÁN, M.; PICAZO-CÓRDOBA, M. I.; GARCÍA-SAUCEDO, F.; WIC-BAENA, C.; GARCÍA-MOROTE, F. A.; RUBIO-CABALLERO, E.; MORENO, J. L.; BASTIDA, F.; GARCÍA, C. & LÓPEZ-SERRANO, F. R.; 2023. Application of a Soil



Quality Index to a Mediterranean Mountain with Post-Fire Treatments. *Forests*, 14(9), 1745. <https://doi.org/10.3390/f14091745>

AEMET.; 2009. Agencia Estatal de Meteorología.

ANERSON, J. P. E.; 1982. Soil Respiration. *Methods of Soil Analysis Agronomy Monograph*, 831-871.

BARREIRO, A.; LOMBAO, A.; MARTÍN JIMÉNEZ, Á.; IGLESIAS, L.; CARBALLAS, T.; DÍAZ-FIERROS, F. & DÍAZ-RAVIÑA, M.; 2011. Utilización de paja en la recuperación de suelos afectados por incendios forestales.

BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNÁNDEZ, T.; & GARCÍA, C.; 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*. 147(3-4), 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>

BREMMER, J. M.; 1965. Inorganic Forms of Nitrogen. In *Methods of Soil Analysis*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1179-1237.

BOTANICO, R. J.; 2001. Claves de flora ibérica: plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares. Real jardín botánico.

CATAÑO, S.; 1997. La estructura cortical del área de unión de las cordilleras ibérica y béticas: interpretación geotectónica basada en datos gravimétricos [Microforma]. Univ de Castilla La Mancha.

CERTINI, G.; 2005. 'Effects of fire on properties of forest soils: a review', *Oecologia*. 143(1), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788>

FONTAINE, S.; BAROT, S.; BARRÉ, P.; BDIOUI, N.; MARY, B. & RUMPEL, C.; 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*. 450(7167), 277–280. <https://doi.org/10.1038/nature06275>

FONTÚRBEL, M. T., FERNÁNDEZ, C. & VEGA, J.A; 2016. Efectos a medio plazo de tratamientos de rehabilitación post-incendio en propiedades microbiológicas del suelo. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencia Forestal*.

GARCIA, C. G., F.; HERNANDEZ, T. & TRASAR, C.; 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Murcia: Ediciones Mundi-Prensa.

GÓMEZ-PLAZA, A.; MARTÍNEZ-MENA, M.; ALBALADEJO, J. & CASTILLO, V.; 2001. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of hydrology*, 253(1-4), 211–229. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(01\)00483-8](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(01)00483-8)

GARCÍA RUIZ, J.M.; BEGUERÍA, S; NADAL ROMERO, E.; GONZÁLEZ HIDALGO, J.; LANA RENAULT, N. & SANJUÁN, Y.; 2013. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*. 239.160–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.015>

IGN; 2025. Atlas Nacional de España (ANE) CC-BY 4.0 Instituto Geográfico Nacional.

JOBÁGY, E. & JACKSON, R.; 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:tvdosol\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:tvdosol]2.0.co;2)

LIANG, C.; SCHIMEL, J. P. & JASTROW, J. D.; 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature microbiology*, 2(UNE-EN:77308), 1-6.



LIU, Y., WANG, X., & FU, B.; 2012. The long-term effects of reforestation on soil microbial biomass carbon in sub-tropic severe red soil degradation areas. *Forest Ecology and Management*, 286, 91-97.

MARTÍNEZ-GARCÍA E., M. H., RUBIO E., GARCÍA-MOROTE FA, ANDRÉS-ABELLÁN M & LÓPEZ-SERRANO FR.; 2018. Effects of post-fire management practices and slope-aspect on medium-term Spanish black pine regeneration: Implications of direct seeding strategy in burnt areas. *European Journal of Forest Research*, 137, 527-540.

MATAIX-SOLERA, J. & A. CERDÀ; 2009. Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España, 25-53.

MOLINA, B. M.; 2019 Evaluación de parámetros biológicos y bioquímicos de un suelo tras un incendio. . *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7.

MORENO, J. M., URBIETA, I. R., BEDIA, J., GUTIÉRREZ, J. M., & VALLEJO, V. R.; 2015. Los incendios forestales en España ante el cambio climático. Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España, 395-405.

NEARY, D. G.; KLOPATEK, C. C.; DEBANO, L. F. & FFOLLIOTT, P. F.; 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest ecology and management*, 122(1-2), 51-71.

NOVARA, A.; GRISTINA, L.; POMA, I. & LAUDICINA, V. A.; 2013. Long-term cropping systems and tillage management effects on soil organic carbon stock and steady state level in a semi-arid environment. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 2154–2161. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.06.0231>

OLSEN, S. S., L. 1983. Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis*, 403-430. PAUSAS, J.G. & KEELEY, J.E.; 2009. A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. *BioScience*, 59(7), pp. 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>

PEREIRA, P.; ÚBEDA, X. & MARTIN, D. A.; 2014. Fire severity effects on soil physical and chemical properties in the aftermath of wildfire. *Geoderma*, 221–222, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.010>.

RIVAS MARTÍNEZ, S.; 1987. Memoria del Mapa de las Series de Vegetación de España 1: 400.000. ICONA (Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

SALGADO, N.; 2023. Análisis de temperatura y precipitación en escenarios de cambio climático para la priorización de áreas vulnerables a incendios forestales en el departamento de cundinamarca.

SÁNCHEZ, M. E. G.; BORJA, M. E. L.; ÁLVAREZ, P. A. P.; ROMERO, J. G.; COZAR, J. S.; NAVARRO, D. M.; & DE LAS HERAS IBÁÑEZ, J.; 2019. Efecto de los trabajos de restauración forestal post-incendio en ladera sobre la recuperación de la funcionalidad del suelo. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (45), 35-44.

SCHLESINGER, W. H., & BERNHARDT, E. S.; 2013. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change; Academic.

SCHMIDT, M.; TORN, M.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I.; KLEBER, M, KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D.; WEINER, S. & TRUMBORE, S.; 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49–56.

<https://doi.org/10.1038/nature10386>

TURNER, B.; FROSSARD, E. & BALDWIN, D.; 2005. Organic phosphorus in the environment. *CABI publishing*. ISBN:0851998224. <https://doi.org/10.1079/9780851998220.0000>

UNE-EN:103301. 1994. Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática.

UNE-EN:77308. 2001. Determinación de conductividad eléctrica.

UNE-EN:13037. 2012. Determinación del pH.

UNE-EN:11461:2014. 2014. Determinación del contenido de humedad del suelo.

VEENSTRA, J. & BURRAS, L.; 2015. Soil profile transformation after 50 years of agricultural land use. *Geoderma*, 239-240, 92-102. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.01.0027>

WALKEY, A. B., I.; 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science*, 29-38.

XU, X.; WANG, Y. & LUO, Y.; 2013. Global patterns of pH and electrical conductivity in ecological studies of soils. *Global ecology and biogeography*, 22(UNE-EN:77308), 930-939. <https://doi.org/10.1111/geb.12045>

ZHANG, K.; DANG, Q.; WANG, Z.; ZHANG, Q. & CHEN, F.; 2021. Effects of soil moisture and temperature on soil respiration in different ecosystems: a global meta-analysis. *Soil biology and biochemistry*, 152, 108061. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108061>

Tabla 1. Análisis de varianza, valores medios y error estándar de cada parámetro para los factores estudiados.

E	T					
	R					
Parámetros	Solana	Umbria	Control	Clareo	1ª recogida	2ª recogida
H	12,5±1,3	15,8±1,3	13,2±1,3	14,9±1,3	14,7±1,1	13,4±1,6
pH	8,66±0,02a	8,44±0,02b	8,57±0,02	8,54±0,02	8,33±0,02b	8,77±0,02a
CE	16,8±0,4	15,6±0,4	15,5±0,4b	16,9±0,4a	20,3±0,4a	12,1±0,4b
da	1,69±0,04a	1,55±0,04b	1,63±0,04	1,62±0,04	1,60±0,04	1,65±0,04
CT	3,20±0,17b	3,78±0,17a	3,43±0,17	3,55±0,17	3,35±0,15	3,62±0,20
NK	0,06±0,01b	0,10±0,01a	0,08±0,01	0,08±0,01	0,08±0,01	0,09±0,01
P	38,0±1,9a	28,1±1,9b	37,4±1,9a	28,6±1,9b	35,9±1,9a	30,1±1,9b
RB	26,0±2,0	23,0±2,0	21,9±2,0	27,0±2,0	25,9±2,0	23,0±2,0
CB	320±70	370±70	360±70	340±70	110±70b	590±70a

ADH	0,030±0,001	0,030±0,001	0,030±0,001	0,030±0,001	0,030±0,001a	0,020±0,001b
qCO ₂	2	18±4	18±4	19±4	17±4	5±4b 31±4a
qm	0,15±0,01	0,18±0,01	0,18±0,01	0,15±0,01	0,15±0,01b	0,18±0,01a

H (%), humedad; *pH*, *pH*; *CE* (mSm^{-1}), conductividad eléctrica; *da* (g cm^{-3}), densidad aparente; *CT* (%), carbono total; *Nk* (%), nitrógeno Kjeldahl; *P* (ppm), fósforo; *RB* ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ día}^{-1}$), respiración basal; *CB* ($\mu\text{g C g}^{-1}$), carbono de la biomasa; *ADH* ($\mu\text{mol INTF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), actividad enzimática de la deshidrogenasa; *qCO₂* ($\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{ CB día}^{-1}$), cociente metabólico; *qm* ($\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{ CT día}^{-1}$), coeficiente de mineralización. Subgrupos homogéneos (a, b) para los factores: *E*, exposición; *T*, tratamiento y *R*, recogida ($n=48$).

Tabla 2. Analisis de Modelo Lineal General, interacciones de cada variable entre los factores Exposición (*E*), Tratamiento (*T*) y Recogida (*R*).

MLG									
Variables ^a	F p			Modelo					
E	T	R	R ⁺ T	E ⁺ T	E ⁺ R	E ⁺ T ⁺ R	R	²	F p
H	1,9	1,2	0,44	0,35	0,57	0,24	0,39	11,76	0,76
pH	72,37***	0,91	283,34***	2,65	0,08	1,10	3,68	86,67	52,02***
CE	4,51*	6,04*	222,93***	2,44	9,46**	5,76*	1,78	81,87	36,13***
da	4,87	0,01	0,50	0,41	0,25	0,00	0,01	43,08	0,86
CT	7,88**	0,05	1,28	0,65	6,32*	1,08	0,28	31,65	2,65*
NK	24,88***	0,12	1,66	0,14	8,41**	0,14	0,14	59,67	5,07**
P	14,16**	10,93**	4,85*	4,87*	0,22	2,18	0,14	40,00	5,33***
RB	1,23	3,56	1,20	1,93	0,91	0,05	5,60*	20,54	2,07
CB	0,28	0,02	23,04***	0,22	0,01	2,22	1,09	52,84	3,84**
ADH	0,00	3,33	46,67***	2,92	0,10	0,73	1,19	49,52	7,85***
qCO ₂	2	0,00	0,15	28,18***	0,49	0,44	0,96	4,84*	38,48 5,00***
qm	3,74	2,04	4,62*	0,71	1,71	0,00	2,00	20,93	2,12

H (%), humedad; *pH*, *pH*; *CE* (mSm^{-1}), conductividad eléctrica; *da* (g cm^{-3}), densidad aparente; *CT* (%), carbono total; *Nk* (%), nitrógeno Kjeldahl; *P* (ppm), fósforo; *RB* ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ día}^{-1}$), respiración basal; *CB* ($\mu\text{g C g}^{-1}$), carbono de la biomasa; *ADH* ($\mu\text{mol INTF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), actividad enzimática de la deshidrogenasa; *qCO₂* ($\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{ CB día}^{-1}$), cociente metabólico; *qm* ($\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{ CT día}^{-1}$), coeficiente de

mineralización. R^2 , coeficiente de determinación; F , F de Snedecor; P , nivel de significación, $P < 0,05$ (*); $P < 0,01$ (**); $P < 0,001$ (***), $n=48$)

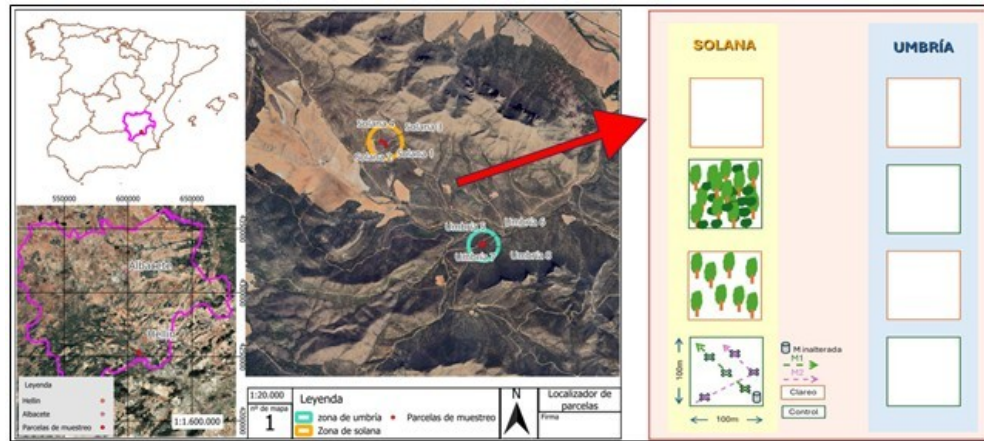


Figura 1. Mapa de situación y diseño experimental.

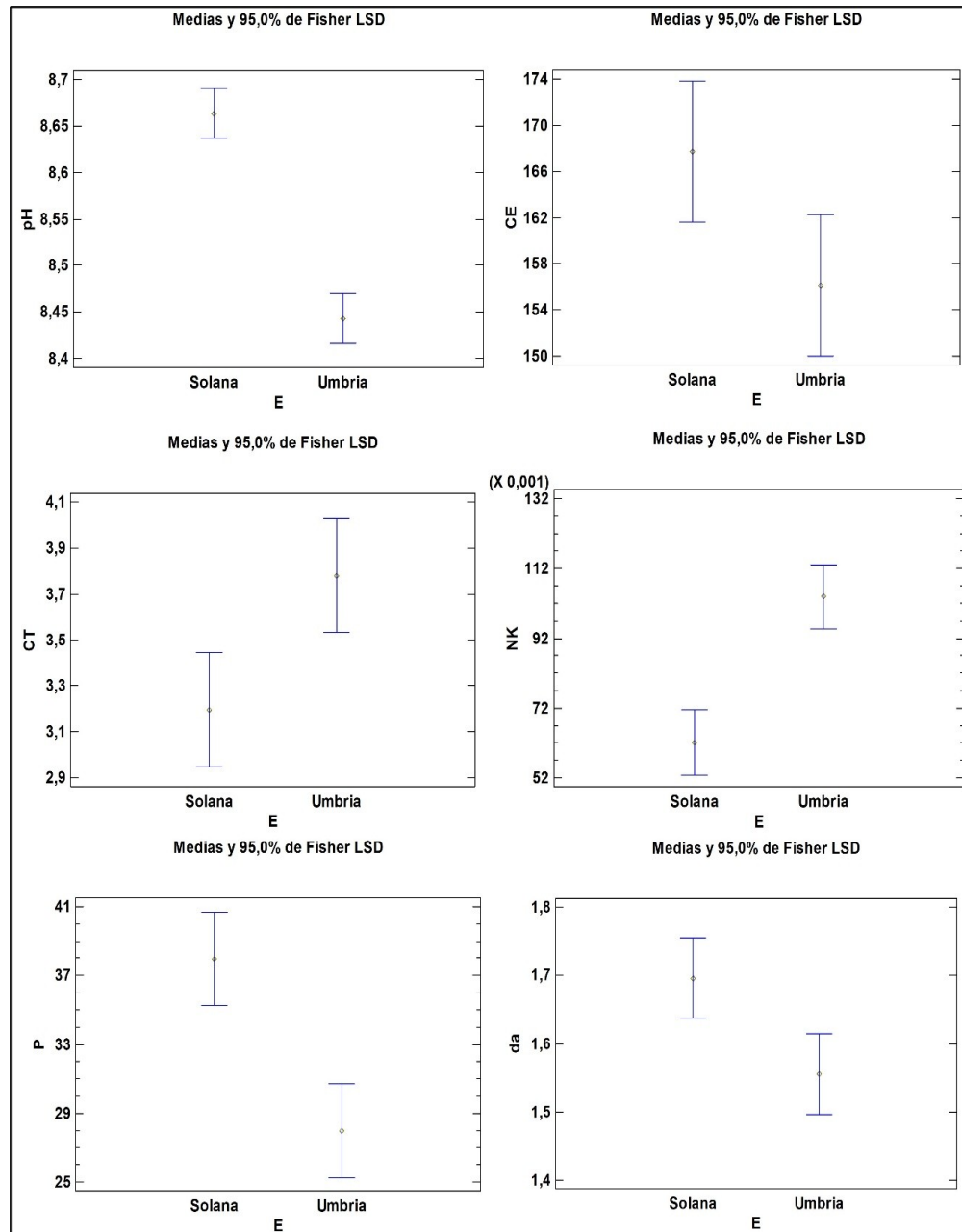


Figura 2. Media y diferencias significativas de Fisher (LSD) con un intervalo de confianza del 95% de los parámetros: pH; CE, conductividad eléctrica; CT, carbono total; NK, nitrógeno Kjeldahl, P, fósforo; da, densidad aparente; para el factor E, exposición (Solana / Umbria).

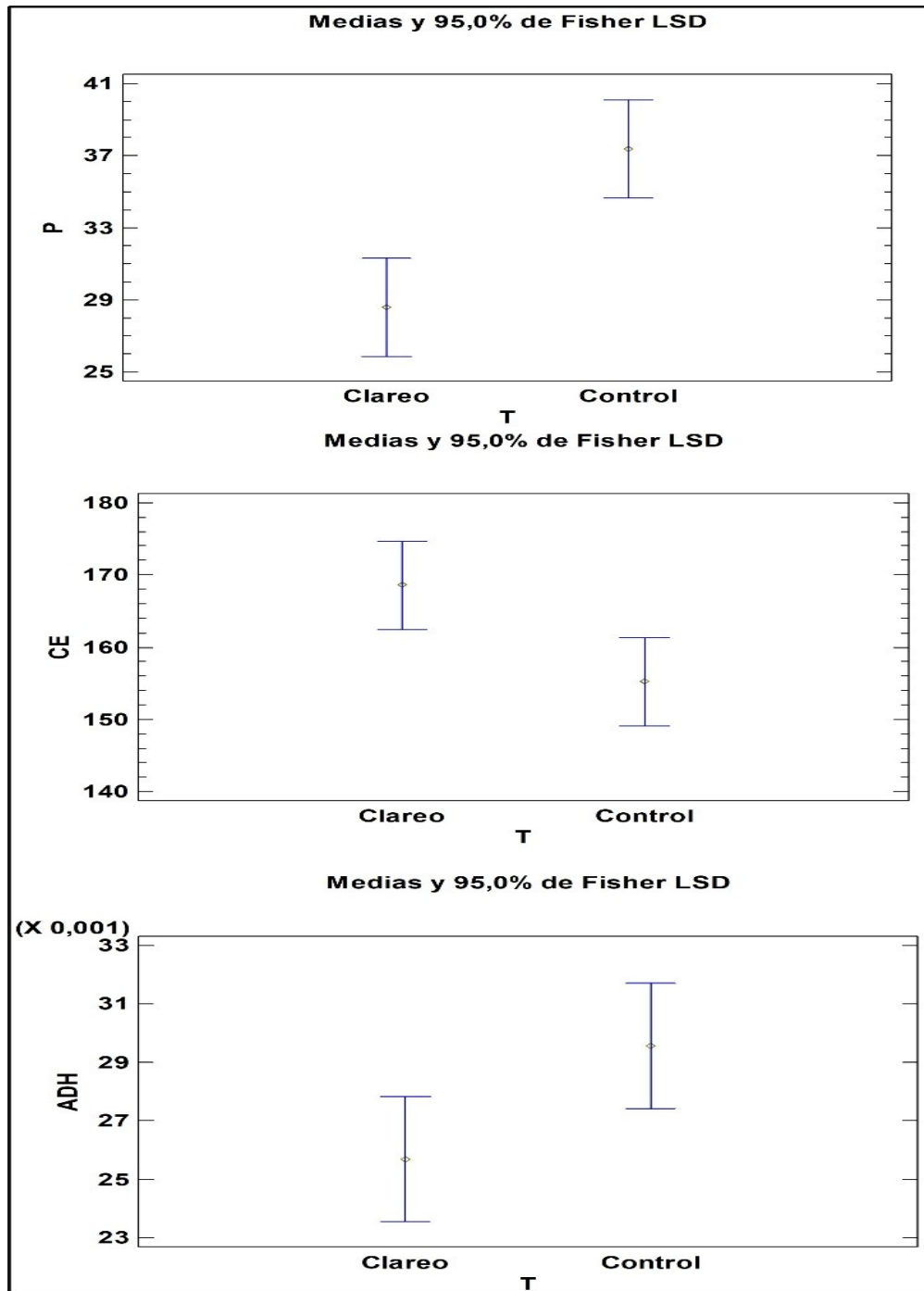


Figura 3. Media y diferencias significativas de Fisher (LSD) con un intervalo de confianza del 95% de los parámetros: P, fósforo; CE, conductividad eléctrica y ADH, actividad enzimática deshidrogenasa; para el factor T, tratamiento (Clareo/Control).

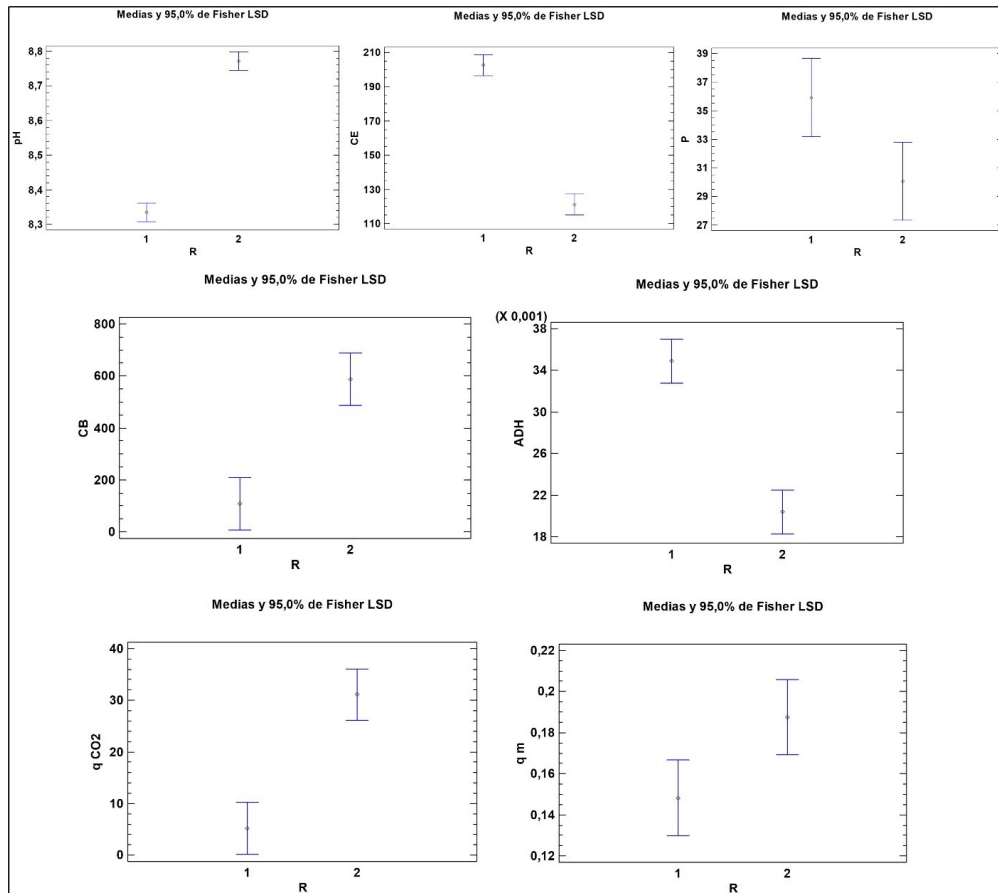


Figura 4. Media y diferencias significativas de Fisher (LSD) con un intervalo de confianza del 95% de los parámetros: pH; CE, conductividad eléctrica; P, fósforo; CB, carbono de biomasa; ADH, actividad enzimática deshidrogenasa; qCO_2 , cociente metabólico y qm , coeficiente de mineralización; para el factor R, recogida (1: 1ª recogida 2023 / 2: 2ª recogida 2024).

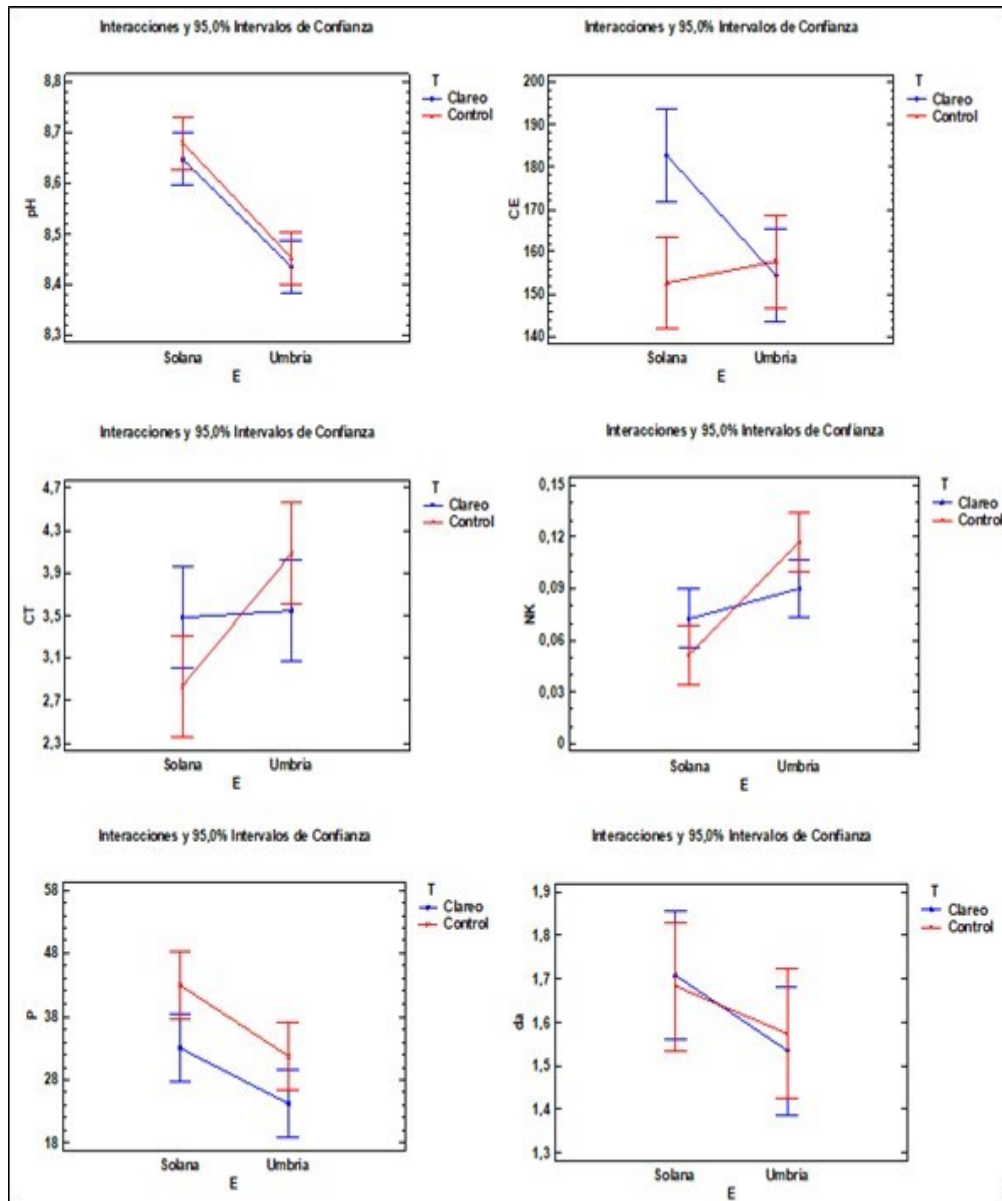


Figura 5. Interacciones entre los factores E, exposición y T, tratamiento, para los parámetros: pH; CE, conductividad eléctrica; CT, carbono total; NK, nitrógeno Kjeldahl, P, fósforo; da, densidad aparente y diferencias significativas de Fisher (LSD) con un intervalo de confianza del 95%.

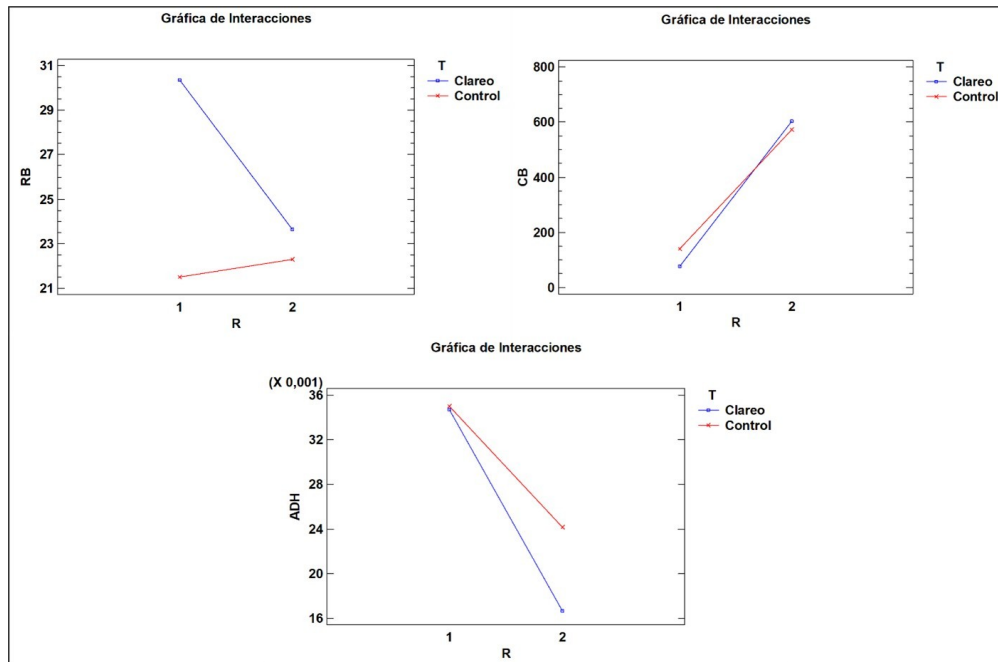


Figura 6. Interacción del tratamiento (Clareo/Control), a lo largo del periodo de recogida (R) (1, 1ª recogida 2023/2, 2ª recogida 2024); en los parámetros microbiológico, RB, respiración basal; CB, carbono de la biomasa y enzimáticos, ADH, actividad de la deshidrogenasa.

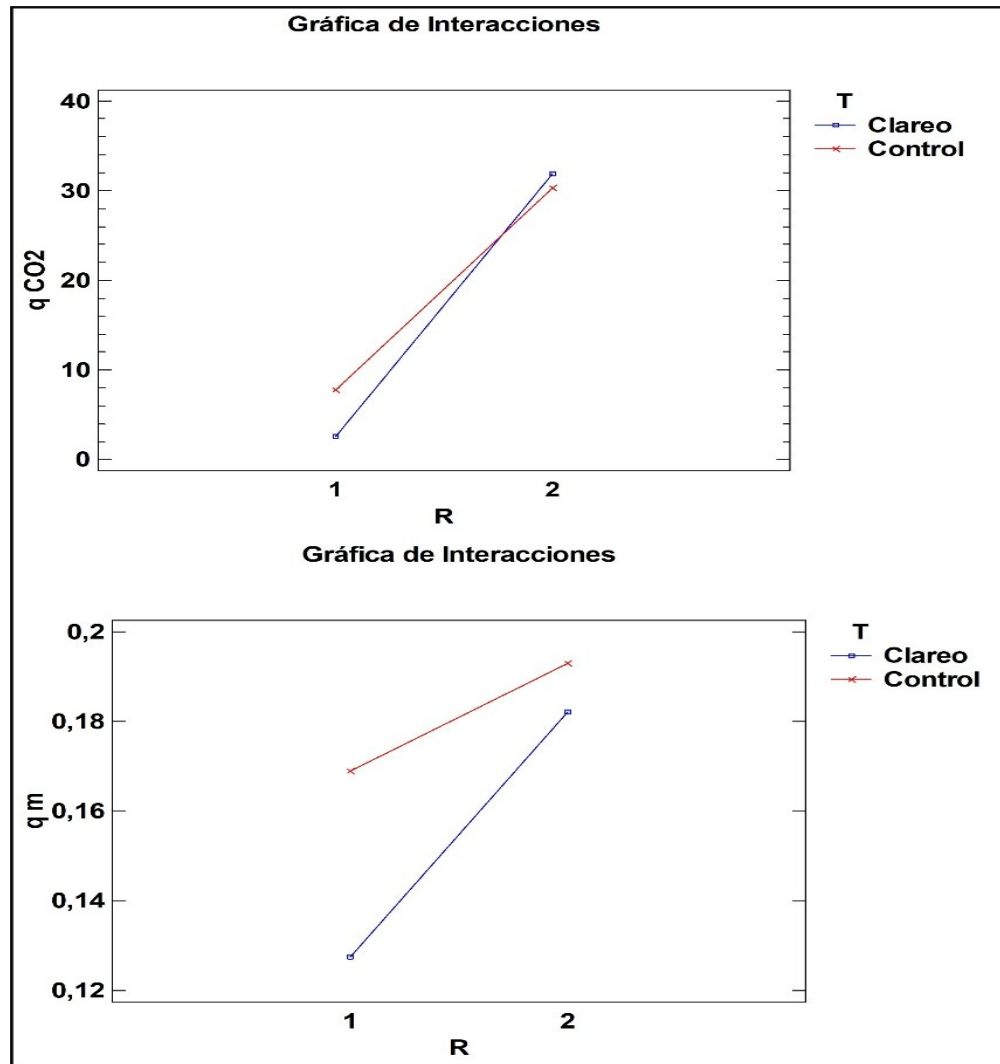


Figura 7. Interacción del tratamiento (Clareo/Control), a lo largo del periodo de recogida (R) (1, 1ª recogida 2023/2, 2ª recogida 2024); en los índices simples de combinados, qCO_2 , cociente metabólico y qm , coeficiente de mineralización.